

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет(інститут) Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра Приладобудування
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність(спеціалізація) 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М.Д. Гераїмчук
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

_____ Прокоповій Наталії Сергіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Дослідження взаємодії імпульсних навантажень на пружні елементи ваговимірювальних систем

науковий керівник дисертації Згуровська Людмила Петрівна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації 22 травня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження: Пружні елементи ваговимірюваних перетворювачів

4. Предмет дослідження: Побудова математичної моделі реакції чутливого елемента на імпульсні навантаження. Вибір типу чутливого елемента для підвищення надійності

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Провести огляд ваговимірюваних систем, які стійкі до імпульсних навантажень. Провести аналіз механічної та метрологічної надійності ваговимірюваного перетворювача з різними пружними елементами. Провести аналіз чутливих елементів. Обґрунтувати необхідність проведення теоретичних та експериментальних досліджень реакції пружного елемента на імпульсні навантаження. Побудувати математичну модель імпульсної деформації чутливого елемента. Провести експериментальні дослідження чутливого елемента на імпульсні навантаження. Обґрунтувати адекватність математичного моделювання. Розробка стартап-проекту. Висновки.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного(графічного) матеріалу: 6.1.Лист огляду аналогів – 1 арк. ф.А1; 6.2. Лист математичної моделі– 1 арк. ф.А1; 6.3. Лист експериментального обладнання – 1 арк. ф.А1; 6.4. Лист графічних залежностей та характеристик – 1 арк. ф.А1; 6.5. Лист збіркового креслення – 1 арк. ф.А1; 6.6. Лист структурного аналізу – 1 арк. ф.А1; 6.7. Презентаційних лист – 1 арк. ф.А1.

7. Орієнтовний перелік публікацій 7.1. Згинний балочний тензорезисторний перетворювач навантаження; 7.2. Аналіз виникнення та захист ваг від перевантажень.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап	Бояринова К.О., доцент		

9. Дата видачі завдання 05 березня 2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Ознайомлення з завданням	05.03.18	
2	Огляд і аналіз літератури	06.03.18-09.03.18	
3	Патентний пошук	12.03.18-13.03.18	
4	Аналіз характеристик чутливих елементів	14.03.18-16.03.18	

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

5	Розробка математичної моделі	19.03.18-30.03.18	
6	Аналітичне дослідження	02.04.18-13.04.18	
7	Експериментальне дослідження	16.04.18-20.04.18	
8	Оформлення магістерської дисертації та її графічної частини	07.05.18	
9	Представлення МД на перевірку науковому керівнику	08.05.18	
10	Передача матеріалів МД на перевірку виявлення збігів/схожості текстів сервісом Unichesk	09.05.18	
11	Представлення МД на рецензію	10.05.18	
12	Представлення МД на затвердження завідуючим кафедрою	11.05.18	
13	Передача електронної версії МД до бібліотеки	17.05.18	
14	Представлення МД до екзаменаційної комісії НТУУ «КПІ імені Ігора Сікорського»	18.05.18	

Студент

(підпис)

Прокопова Н.С.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Згуровська Л.П.
(ініціали, прізвище)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний
(повна назва інституту факультету)

Приладобудування
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 681.269.6

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ М.Д. Гераїмчук
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і назва спеціальності)

на тему: Дослідження взаємодії імпульсних навантажень на пружні
елементи ваговимірювальних систем

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ПІ-61м
(шифр групи)

_____ Прокопова Наталія Сергіївна _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник Згуровська Людмила Петрівна, к.т.н., доцент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

\

Київ – 2018 року

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на магістерську дисертацію		
2	A4	МД.ПІ61м.03.01	Пояснювальна записка	96	
3	A1	МД.ПІ61м.02.02.01	Огляд аналогів	1	
4	A1	МД.ПІ61м.02.02.02	Математична модель	1	
5	A1	МД.ПІ61м.02.02.03	Установка	1	
6	A1	МД.ПІ61м.02.02.04	Графіки	1	
7	A1	МД.ПІ61м.02.02.05	Креслення	1	
8	A1	МД.ПІ61м.02.02.06	Структурний аналіз	1	
9	A1	МД.ПІ61м.02.02.07	Презентація	1	
					7 арк.ф. А1

				МД.ПІ61м.00.03.00		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Прокопова Н.С.			Відомість магістерської дисертації	Лист	Листів
Керівн.	Згуровська Л.П.				1	1
Конс. (Т)					КПІ імені Ігоря Сікорського каф. ПБ гр. ПІ – 61м	
Конс. (Е)						
Конс. (О)						
Н/контр.						
Зав.каф.						

Магістерська дисертація

на тему: Дослідження взаємодії імпульсних навантажень на пружні елементи ваговивірювальних систем

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Об'єм пояснювальної записки даної магістерської дисертації складає 96 сторінок. Пояснювальна записка має: 46 рисунків, 27 таблиць, 7 креслень, 1 додаток, 21 використаних джерел.

Метою дослідження даної магістерської дисертації є вирішення задачі аналізу метрологічних параметрів чутливого елемента ваговимірювального перетворювача з використанням сучасних комп'ютерних технологій. Проаналізовано основні елементи ваговимірювального перетворювача на основі тензорезисторних датчиків. Сформульовано критерії оцінки та граничні числові значення характеристик динамічних властивостей чутливих елементів ваговимірювальних перетворювачів, які працюють при впливі імпульсних навантажень. Розроблено універсальну математичну модель.

Експериментальні дослідження включали визначення власної частоти тензорезисторних перетворювачів. Експериментальна установка побудована на базі плати L-Card, з використанням програмного забезпечення L-Graph. Обробка результатів імпульсних перехідних функцій виконується у MatLab. Розроблені математичні моделі датчика дозволяють проаналізувати характер його роботи при імпульсному навантаженні.

Об'єктом дослідження є пружні елементи ваговимірювальних тензометричних перетворювачів. Предметом дослідження: побудова математичної моделі реакції чутливого елемента на імпульсні навантаження.

Дані результати були опубліковані на науковій конференції «Погляд у майбутнє приладобудування».

Ключові слова: *імпульсні навантаження, ваговимірювальні системи, тензодатчик, надійність.*

ABSTRACT

The volume of the explanatory note of this master's thesis is 96 pages. The explanatory note has: 46 drawings, 27 tables, 7 drawings, 1 supplement, 21 sources used.

The aim of this study master's thesis is to solve the problem analysis metrological parameters of sensor weighing transducer using modern computer technology. The basic elements of the weight measuring transducer on the basis of strain gauge sensors are analyzed. Criteria evaluation and limits numeric values of the characteristics of dynamic properties of sensitive items weighing converters that operate under the influence of pulsed loads. A universal mathematical model is developed.

Experimental studies included the determination of the eigen frequency of the strain gauge transducers. The experimental installation is based on the L-Card, using the L-Graphic software. The processing of impulse transient functions results in MatLab. The developed mathematical models of the sensor allow to analyze the nature of its work under pulse loading.

The object of the study is the elastic elements of weighing strain gauge converters. Subject of research: construction of a mathematical model of the response of a sensitive element to pulsed loads.

These results were published at the scientific conference "A Look at the Future of Instrumentation".

Key words: *impulse loading, weighting systems, strain gauge, reliability.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
Перелік умовних позначень.....	12
РОЗДІЛ 1.ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАГОВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ.....	13
1. Огляд аналогів	13
1.1 Огляд аналогів ваговимірюваних систем, які стійкі до імпульсних навантажень.....	13
1.1.1 Ваги платформні протиударні «Граніт».....	13
1.1.2.Ваги товарні АВП-Т.....	16
1.1.3.Ваги платформні «Зевс».....	18
1.1.4.Платформні ваги (Міка).....	20
1.2. Огляд аналогів пружних елементів.....	20
1.2.1. Тензометричний датчик мембранного типу.....	20
1.2.2. Тензометричний балочний датчик на згин.....	21
1.2.3. Тензометричний датчик S-образного типу.....	22
1.3. Аналіз метрологічної та механічної надійності ваговимірювального перетворювача з різними видами чутливого елемента.....	24
3.Розробка принципової схеми перетворювача.....	27
2.1 Структурний аналіз перетворювача	27
2.2 Розробка електричної схеми.....	29
3. Розрахунок основних характеристик перетворювача.....	35
3.1 Розрахунок статичної характеристики.....	35
3.2 Розрахунок динамічної характеристики.....	35
4. Аналіз точності перетворювача.....	46
ВИСНОВОК ПО РОЗДІЛУ.....	46

РОЗДІЛ 2. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....47

2.1.Обґрунтування необхідності проведення теоретичних та експериментальних досліджень реакції пружного елемента на імпульсні навантаження.....47

2.1.1.Побудова математичної моделі деформації чутливого елемента при імпульсному впливі.....47

2.1.2.Проведення експериментальних досліджень чутливого елемента на імпульсні навантаження.....53

2.1.3 Обґрунтування адекватності математичного моделювання.....74

ВИСНОВОК ПО РОЗДІЛУ.....74

РОЗДІЛ 3.РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....76

3.1 Опис ідеї проекту.....76

3.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....77

3.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....78

3.4 Розробка ринкової стратегії проекту.....86

3.5 Розроблення маркетингової програми.....89

ВИСНОВОК ПО РОЗДІЛУ.....93

ВИСНОВКИ.....94

Список використаної літератури.....95

ДОДАТКИ.....96

ВСТУП

Актуальність теми. Ваговимірювання в Україні є одним з важливішим технологічних операцій сучасного виробництва. Під ваговимірюванням розуміється процес зважування та методи обробки вимірювань в динаміці. Автоматизація ваговимірювання включає в себе: вимірювання маси(ваги) об'єкта без участі людини; підвищення точності та оперативності процесу; передачі отриманої інформації в доступній формі.

Для сучасного виробництва швидким темпом зростають вимоги до метрологічних характеристик вимірювальної техніки.

Для вибору платформних ваг, які застосовуються у важких експлуатаційних умовах необхідно врахувати технічні, технологічні та метрологічні характеристики. Так при використанні ваг у металургійному виробництві для зважування компактних, важких і жорстких металевих виробів, виникає небезпека пошкодження ваг вантажем при його установці на ваги внаслідок виникаючих ударів. Для вирішення експлуатаційної надійності необхідно застосовувати ваги спеціальних конструкцій – протиударні ваги.

Метою дослідження є формування критеріїв оцінки та граничних числових значень характеристик динамічних властивостей чутливих елементів ваговимірювальних перетворювачів, які працюють при впливі імпульсних навантажень.

Об'єктом дослідження є пружні елементи ваговимірюваних тензOMETричних перетворювачів.

Предмет дослідження: побудова математичної моделі реакції чутливого елемента на імпульсні навантаження; вибір типу чутливого елемента для підвищення надійності.

Перелік умовних позначень

$U_{\text{жив}}$ - напруга живлення вимірювального ланцюга.

$U_{\text{вих}}$ - вихідна напруга вимірювального ланцюга.

S - чутливість мостового вимірювального ланцюга.

ε_{1-4} - відносні зміни опорів тензорезисторів.

κ - коефіцієнт симетрії моста.

k_T - коефіцієнт тензочутливості.

$\varepsilon_{\tau 1-\tau 4}$ - зсувні деформації, що виникають в балках при впливі навантаження, яке вимірюють.

G - модуль пружності другого роду.

E - модуль Юнга.

μ - коефіцієнт Пуассона.

τ - дотичне напруження.

P_n - найбільша границя зважування.

$S_{\text{сеч}}$ - площа поперечного перерізу стержня.

α_d - температурний коефіцієнт чутливості датчика при відсутності термокомпенсації чутливості.

β_0 - наведений температурний коефіцієнт нуля датчика при відсутності температурної компенсації нуля.

b – ширин балки.

h – товщина балки.

l – довжина балки.

ρ - щільність матеріалу.

ω, ω_0 - власна частота коливань пружних систем.

ε - відносна деформація.

σ - напруга.

M - сконцентрована маса

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАГОВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

1. Огляд аналогів

1.1 Огляд аналогів ваговимірюваних систем, які стійкі до імпульсних навантажень

При використанні ваг в металургійному виробництві для зважування компактних, важких і жорстких металевих виробів, виникає небезпека пошкодження ваг вантажем при його установці на ваги внаслідок виникаючих ударів. Для вирішення експлуатаційної надійності необхідно застосовувати ваги спеціальних конструкцій - протиударні ваги.[1]

Промислові тензометричні платформні ваги, як правило, представляють собою прямокутну вантажоприймальну платформу, яка встановлюється на чотири тензодатчика. Вага вантажу сприймається тензодатчиками. Визначення маси вантажу проводиться через суму сигналів з кожного датчика.[1]

1.1.1 Ваги платформні протиударні «Граніт»

Ваги призначені для застосування у важких умовах експлуатації. Конструктивне виконання забезпечує максимально можливий захист від ударних вертикальних і бічних навантажень.

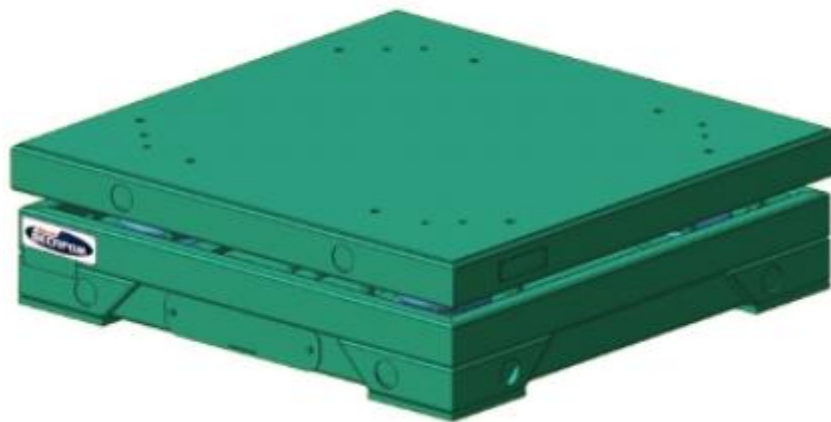


Рисунок 1. Платформні ваги «Граніт»

Підвищенню точності вимірювання вантажу є зміщення вузла вмонтування щодо центру вантажоприймальної платформи.

Спрощення установки і монтажу ваг завдяки зменшенню площі опори тензодатчика і підвищенню жорсткості нижньої рами .

Зі збільшенням ходу середньої рами отримали більшу захищеність тензодатчиків від пошкоджень при бічних ударах платформи.

Вище перераховані умови підвищують термін безаварійної експлуатації, знижують фінансові та часові витрати на обслуговування ваг.

Технічні характеристики

Вантаж, що зважується: лист, труба, прокат, арматура довжиною до 12 метрів і масою до 20 тонн.

Максимальне навантаження: 10; 15; 20 т.

Розмір платформи ваговимірювального механізму:

- довжина: 6000, 9000, 12000 мм;
- ширина: 1500 мм.

Температура навколишнього середовища:

- для ваговимірювального механізму: -50...+50 °С;
- для ваговимірювального приладу: -10(-35)...+40 °С(-40...+40 °С при використанні вимірювальної шафи з системою обігріву).

Ваги застосовуються в умовах інтенсивної експлуатації підвищених ударних навантаженнях; при облікових та технологічних операціях на металургійних підприємствах та інших галузях важкої промисловості.

Конструкція ваг

Ваговимірювальний механізм має конструктивно безвідмовний захист тензодатчиків від ударних навантажень.

Конструкція складається з вантажоприймальної платформи (1), що спирається на середню раму (2) через демпфуючі пружинні блоки (3). Пружинні блоки кріпляться на вузли вмонтування тензодатчиків (4)

(кульова опора). Тензодатчики розміщуються на нижній рамі ваг(5). Як показано на рисунку 2.

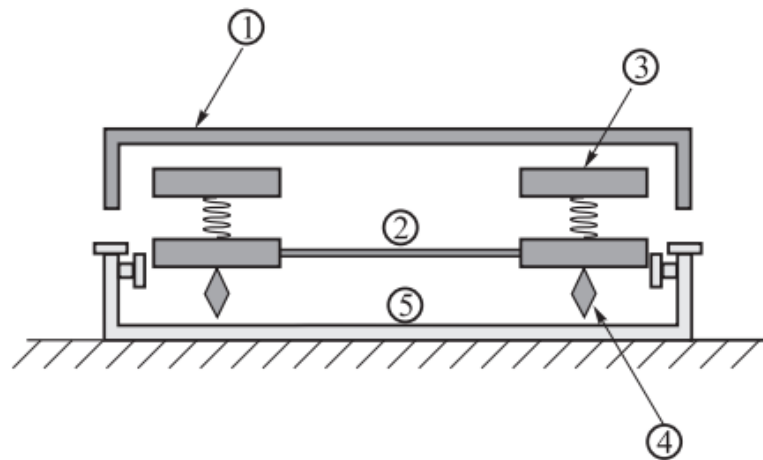


Рисунок 2. Схема ваговимірювального механізму

При вертикальному навантаженні на тензодатчики безпечний рівень забезпечується демфуючими пружинними блоками (3). При перевищенні маси вантажу на величину понад граничну, вантажоприймальна платформа (1) спирається на обмежувачі вертикальних переміщень, за рахунок чого навантаження на тензодатчики не перевищує безпечну величину. (Рис.3)

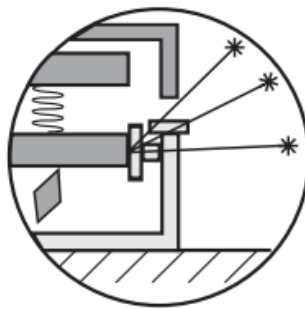


Рисунок 3.Обмежувачі вертикальних переміщень

При бічних ударах по ваговимірювальному механізму, захист тензодатчиків забезпечується застосуванням вузлів встройки типу кульова опора і обмежувачами бічних переміщень середньої рами (Рис.4).[2]

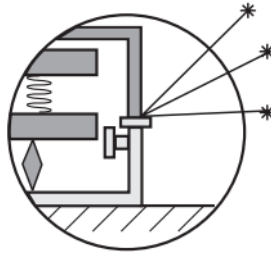


Рисунок 4. Обмежувач при бічних ударах

1.1.2.Ваги товарні АВП-Т

Електронні платформні ваги АВП-Т призначенні для визначення маси вантажів у промислових умовах з автоматичною реєстрацією результатів зважування. (Рис. 5) [3]



Рисунок 5.Ваги платформні АВП-Т

Конструкція даних ваг дозволяє забезпечити високі експлуатаційні характеристики ваг і захистити датчики від руйнування під дією ударних навантажень.

Переваги

- 1) Спеціальні пристрої, що гасять динамічні максимальні навантаження, в тому числі падіння вантажу на ваги.
- 2) Захист датчика від руйнування.
- 3) Робота в умовах низьких температур.

Ваговимірювальні датчики виконані з якісної нержавіючої сталі в пиловодонепроникному корпусі (клас захисту IP68) з вбудованою температурною компенсацією. Не потребують спеціального обслуговування.

Підключення датчиків відбувається з допомогою спеціальної клемної коробки, яка дозволяє усунути похибку кутових навантажень платформи ваг, виникаючих при виконанні монтажних та будівельних робіт.

Індикатор

Індикатор - пристрій додаткової індикації виробництва фірми Flintec. Наявність індикатора підвищує надійність функціонування ваг, так як він сам є приладом обробки і індикації даних з ваг. Індикатор може самостійно функціонувати без вагового процесора, не вимагає спеціального обслуговування.

Ваговий процесор

Ваговий процесор призначений для обробки даних зважування, формування і друку стандартних звітних форм, оснащений оригінальним програмним забезпеченням. Наявність вагового процесора забезпечує зручність роботи оператора ваг, дозволяє розширити область діагностування помилок зважування, підвищити надійність функціонування ваг, виключити «людський фактор» з процесу зважування вантажів.

Основні переваги перед аналогами

Висока надійність і стабільність показань за рахунок використання комплектуючих визнаних передових фірм - світових лідерів.

Дистанційний контроль. Можливо віддалене керування вагами на відстані до декількох кілометрів.

Суворе дотримання технології зважування (забезпечується програмними засобами).

Точний розрахунок маси вантажу в автоматичному режимі на підставі зважувань маси тари.

Незмінність метрологічних параметрів калібрування забезпечується захистом: шифруванням і кодом доступу.

Спеціальний двомірний фільтр результатів зважування дозволяє швидко і ефективно зробити будь-яку вибірку за заданий звітний період.

Калібрування та повірка інтегровані в ваговий процесор з автоматичним формуванням протоколів.[3]

1.1.3.Ваги платформні «Зевс»

Ваги електронні платформні «ЗЕВС» протиударні призначені для зважування в статичному режимі різних вантажів у складних умовах перевантажень важкої промисловості. (Рис. 6)

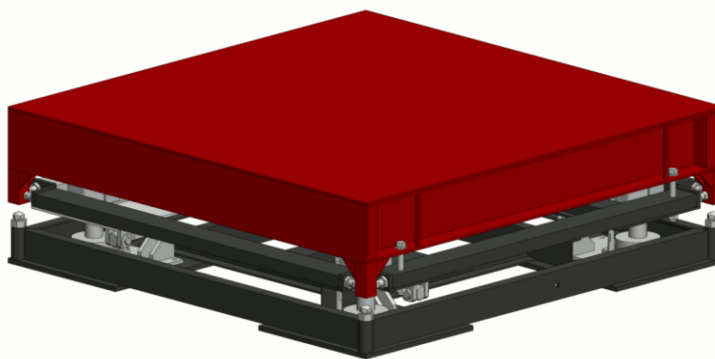


Рисунок 6. Ваги «Зевс»

Область застосування: підприємства важкої, металургійної, гірничо-видобувної, хімічної промисловості, енергетики, збагачувальних і переробних галузей промисловості, на підприємствах буд-індустрії, а також на автотранспортних підприємствах.

Спеціальна протиударна конструкція ваг забезпечує захист тензометричних датчиків от надмірних ударних навантажень. Зазвичай призводить до пошкодження і виходу з ладу ваг за допомогою крана, тельфера, магнітного захоплення, а також при випадковому падінні вантажу.

Найбільша границя зважування (НГЗ) ваг - від 1 до 60 т.

Принцип дії ваг полягає в перетворенні дії сили тяжіння вантажу, що зважується за допомогою тензометричних датчиків в електричний сигнал, значення якого вимірюється і відображається на дисплеї цифрового вагового терміналу.

Технічні характеристики

1. Найбільша границя зважування (НГЗ) 1-60 т
2. Найменша границя зважування (НмГЗ) 0,01-0,4 т
3. Клас точності згідно з ДСТУ EN 45501: 2011 середній
4. Поріг чутливості на всьому діапазоні вимірювань повинен бути такий, щоб плавне зняття або установка на ваги вантажу масою, яка дорівнює від 1 до 1,4е, викликало зміна первинних свідчень на 1е.
5. Тривалість циклу зважування (час вимірювання), не більше, 5 с.
6. Електричне живлення ваг повинно здійснюватися змінним однофазним струмом з частотою (50 ± 1) Гц і напругою від 187 до 242 В.
7. Метрологічні характеристики повинні бути збережені при граничних значеннях відхилення напруги електричної мережі (187 В, 242 В) і в усьому діапазоні робочих температур.
8. Потужність, не більше 15 ВА.
9. Вид кліматичного виконання, ступінь захисту по ГОСТ 14254-80:
 - для тензометричних датчиків - IP68;
 - для цифрового вимірювального приладу - IP65.[4]

1.1.4.Платформні ваги (Міка)

Ваги платформні призначені для зважування в статиці різних вантажів і виконання облікових операцій у виробництві, на складах і в автоматизованих системах різного призначення. (Рис. 7)

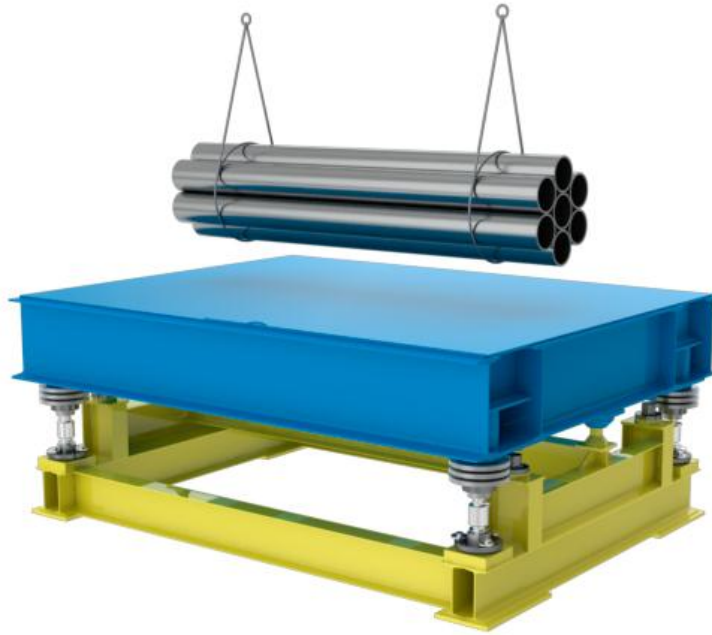


Рисунок 7. Ваги платформні (Міка)

Ваги складаються з вантажоприймального пристрою і вагового контролера. Функціонал ваг: автоматична або ручна тара; індикація значень; накопичення та індикація суми результатів. [5]

1.2. Огляд аналогів пружних елементів

Аналіз світового ринку ваг показав, що основні фірми-виробники вагового обладнання виготовляють ваги, які побудовані на тензометричних датчиках.

1.2.1. Тензометричний датчик мембранного типу (шайба)

Мембранний тип датчика використовується для виготовлення бункерних, автомобільних, вагонних ваг, а також в інших вагодозуючих системах, де звичайні датчики не можуть бути вмонтовані через великі габаритні розміри. (Рис. 8)

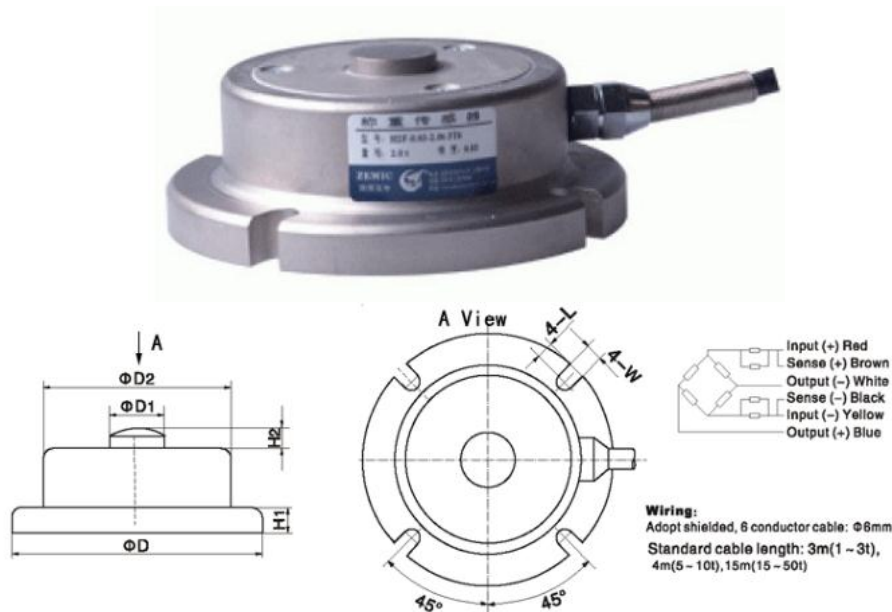


Рисунок 8. Датчик мембранного типу

Завдяки високим метрологічним характеристикам цей тип датчика знаходить широке використання в багатьох промислових системах ваговимірювання.

Корпус виготовлений зі сталі з нікелевим покриттям, клас захисту тензодатчика IP67.

Компактність та невелика висота забезпечує швидку та надійну установку. Навантаження, яке сприймає датчик: від 1 до 50 т.[6]

1.2.2. Тензометричний балочний датчик на згин

Балочний тип датчиків використовується для виготовлення платформних ваг та ваговимірювальних систем. Завдяки низькому профілю та високим метрологічним характеристикам цей тип датчиків знаходить використання в багатьох промислових системах ваговимірювання. (Рис. 9)



Габаритные размеры mm(в дюймах)

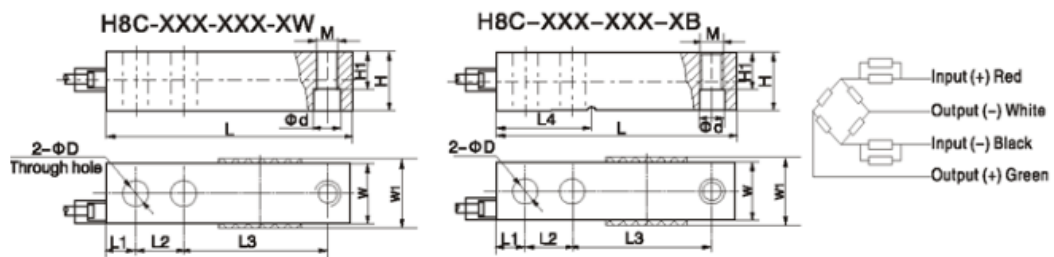


Рисунок 9. Тензометричний балочний датчик

Корпус виготовлений зі сталі з нікелевим покриттям, клас захисту IP67, навантаження від 0,5 до 10 т.[9]

1.2.3. Тензометричний датчик S-образного типу

Датчик S-образного типу використовується для виготовлення бункерних, кранових, платформних ваг, тестових систем, розривних машин, а також при модернізації механічних ваг. (Рис. 10)

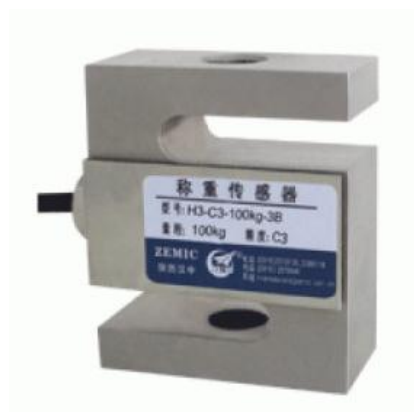


Рисунок 10. Датчик S-образного типу

Завдяки високим метрологічним характеристикам цей вид датчиків знаходить широке використання в багатьох промислових системах ваговимірювання.

Корпус виготовлено зі сталі з нікелевим покриттям, класу захисту IP67, навантаження від 0,025 т до 30 т.

На прикладі оберемо датчик ESIT типу SC (Рис. 11). Тензодатчик був розроблений для вимірювання сили та маси з високою точністю при високих перевантаженнях і працює по принципу стиску. Міцна конструкція датчика дозволяє витримувати високі горизонтальні та вертикальні навантаження.

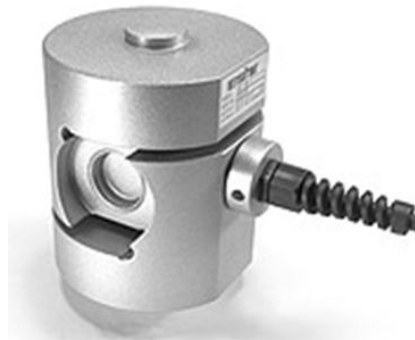


Рисунок 11. Тензодатчик зсувного типу

Особливості

- велика вантажопідйомність
- висока точність
- стійкість до перевантажень
- низький профіль
- клас захисту IP68[6]

Висновок з огляду аналогів. За еталонний ВВП маємо платформні ваги протиударні виробництва Міка. Обраний тензометричний датчик – SC-типу.

1.3. Аналіз метрологічної та механічної надійності ваговимірювального перетворювача з різними видами чутливого елемента

Основні причини перевантаження платформних ваг - нерівномірність розподілу навантаження між датчиками та динамічна взаємодія платформи та вантажу. Метрологічна надійність ваг зумовлена появою пружних недосконалостей пружних чутливих елементів (ПЧЕ) тензорезисторних перетворювачів в результаті дії механічних напружень, які перевищують допустимі. Підвищення допустимих навантажень на ПЧЕ призводить до збільшення найбільшої границі вимірювання (НГВ) датчиків, що призводить до зменшення їх чутливості та вихідних сигналів мілівольтного діапазону, і як наслідок, до суттєвої втрати точності вимірювання.

Метрологічний контроль за використанням ваговимірювальної техніки в законодавчо-регульованих областях базується на суворому дотриманні вимог нормативно-правових документів – державних технічних регламентів. Для підтвердження суттєвих вимог технічних регламентів засоби ваговимірювальної техніки повинні задовольняти вимогам нормативно-технічних документів - державних стандартів, які базуються на Рекомендаціях Міжнародної організації законодавчої метрології (МОЗМ-OIML). Для неавтоматичних зважувальних приладів, які використовують тензорезисторні датчики, це рекомендації OIML R76 та R60.

Вимоги для датчиків згідно ДСТУ EN 45501:2015 [1] визначають найбільшу границю вимірювання датчиків з урахування коригувального коефіцієнта Q , який враховує можливий вплив навантаження поза центром, постійне навантаження від вантажоприймального пристрою, діапазон початкового устанавлення на нуль і нерівномірність розподілу навантаження. Рекомендації OIML та WELMEC $Q=2$ [2,3].

Нехай в системі координат OXY , яка пов'язана з жорсткою платформою, задані координати точок (X_i, Y_i) $i=1 \dots n$, в яких відбувається опір платформи на n силовимірювальних перетворювачів. Тоді, при розташуванні вантажу вагою $G_0 = M_0 \cdot g$ (де M_0 – маса вантажу, g – прискорення сили тяжіння) з координатами центру мас в точці (X_0, Y_0) , можна записати наступну систему рівнянь статички:

$$\begin{aligned} G_0 &= R_1 + R_2 + \dots + R_n \\ X_0 \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n) &= X_1 \cdot R_1 + X_2 \cdot R_2 + \dots + X_n \cdot R_n \\ Y_0 \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n) &= Y_1 \cdot R_1 + Y_2 \cdot R_2 + \dots + Y_n \cdot R_n \end{aligned} \quad (1)$$

де R_i збільшення зусиль на i -й датчик, яке викликане дією ваги G_0 .

Введемо у розгляд задачі коефіцієнт $\xi_i(X, Y)$, який характеризує перевантаження i -го датчика в результаті зміщення центру мас вантажу в точку з координатами (X, Y) . Коефіцієнт $\xi_i(X, Y)$ визначимо як відношення зусиль R_i , які сприймаються датчиками при розташуванні вантажів в точках з координатами центрів мас (X, Y) та (X_0, Y_0) . $\xi_i(X, Y) = R_i(X, Y) / R_i(X_0, Y_0)$. Для оцінки перевантаження доцільно оцінити зміну навантаження датчиків відносно навантаження в точці рівновіддаленої від датчиків. В нашому випадку – це центр платформи. Розв'язок системи рівнянь (1) відносно $\xi_i(X, Y)$ має на довільній прямій кусково-лінійний характер з максимумами в точках, які співпадають з координатами встановлення датчиків (X_i, Y_i) $i=1 \dots n$. В цих точках коефіцієнт навантаження приймає значення n , так як все навантаження сприймається одним перетворювачем. Тобто для платформ на чотирьох датчиках ($n=4$) навантаження в два рази перевищує навантаження, яке рекомендоване [1,2,3].

Оцінимо іншу складову перевантаження датчиків, яка викликана динамічними взаємодіями жорстких платформ та вантажу. Нехай вантаж масою M_0 встановлюється на платформу з початковою швидкістю V_0 . Оцінку проведемо в припущенні, що вся кінетична енергія вантажу

переходить в потенціальну енергію стиску пружних елементів тензоперетворювачів. В цьому випадку, навантаження на датчик можна оцінити з наступної рівності $0,5 \cdot M_0 \cdot V_0^2 = 0,5 \cdot C_x \cdot S_{\max}^2$, де C_x – жорсткість та S_{\max} – максимальна деформація системи платформа-датчик під навантаженням. Якщо прийняти $R_{\max} = C_x \cdot S_{\max}$, отримаємо наступну оцінку $R_{\max}' = M_0 \cdot V_0^2 / S_{\max}$, а коефіцієнт перенавантаження $\xi'' = R_{\max}' / M_0 \cdot g = V_0^2 / (g \cdot S_{\max})$.

Навантаження датчика, яке викликане падінням вантажу на платформу з висоти H , можна оцінити з рівності потенціальних енергій, як $M_0 \cdot g \cdot H = 0,5 \cdot C_x \cdot S_{\max}^2$. Одержимо $R_{\max}'' = 2 \cdot M_0 \cdot g \cdot H / S_{\max}$, а коефіцієнт перенавантаження $\xi'' = R_{\max}'' / M_0 \cdot g = 2 \cdot H / S_{\max}$.

Розраховані числові значення коефіцієнтів перевантаження ξ' та ξ'' для поширених ваговимірювальних датчиків RTN та C16A (виробництво НВМ, Німеччина) при $M_0 = \text{НГВ}$, $V_0 = 0.40$ м/с та $H = 0,05$ м, $g = 0.981$ м/с² та співвідношенні деформацій датчиків та платформи 1:10 (дивись табл.1)

Таблиця 1. Коефіцієнти динамічного перевантаження ваговимірювальних датчиків

Датчик	НГВ, кг	S_{\max} , мм	ξ'	ξ''
RTN	22 000	0,21	12,1	47,6
	47 000	0,33	7,7	30,3
	68 000	0,35	7,3	28,6
C16A	20 000	0,65	3,9	15,4
	40 000	0,85	3,0	11,8
	60 000	1,22	2,1	8,2

Одержані оцінки коефіцієнтів перевантаження обґрунтовують необхідність конструктивних рішень при проектуванні ваг, які плануються до використання в важких умовах експлуатації.[7]

2.Розробка принципової схеми перетворювача

2.1 Структурний аналіз перетворювача

Структура вимірювального пристрою представляється у вигляді сукупності вимірювальних перетворювачів, які здійснюють функціональні вимірювальні перетворення сигналів різної фізичної природи. Існує безліч різновидів вимірювальних пристроїв, але всі ці пристрої виконуються на основі обмеженої кількості вимірювальних перетворювачів.

Так в наш час розроблено багато різних типів тензорезисторних перетворювачів. Це датчики для вимірювання ваги, тиску, зусилля, деформації, моментів та інших фізичних величин. Датчики мають різні межі вимірювання, відрізняються конструктивним виконанням, призначені для різних умов експлуатації. Але, представляючи тензорезисторний датчик у вигляді послідовного ланцюга вимірювальних перетворювачів, можна помітити, що деякі з цих вимірювальних перетворювачів є загальними для всіх датчиків. Кожен тензорезисторний датчик включає в себе такі вимірювальні перетворювачі, як тензорезистор і вимірювальна ланцюг, незалежно від того, чи є він датчиком ваги або переміщення. Дуже багато тензорезисторні датчики включають в себе пружний елемент, що перетворює вага або тиск в деформацію.

На рисунку представлена структурна схема тензорезисторного перетворювача сили. Вимірюване зусилля F пружним елементом 1 перетворюється у відносну деформацію зсуву ϵ_r . Деформація ϵ_r сприймається наклеєними на його тензорезисторами 2 і перетворюються у відносне вимірювання опору ϵ_R , яке в вимірювальному ланцюгу 4 перетворюється в величину вихідної напруги $U_{\text{вих}}$. (Рис. 12) [10]

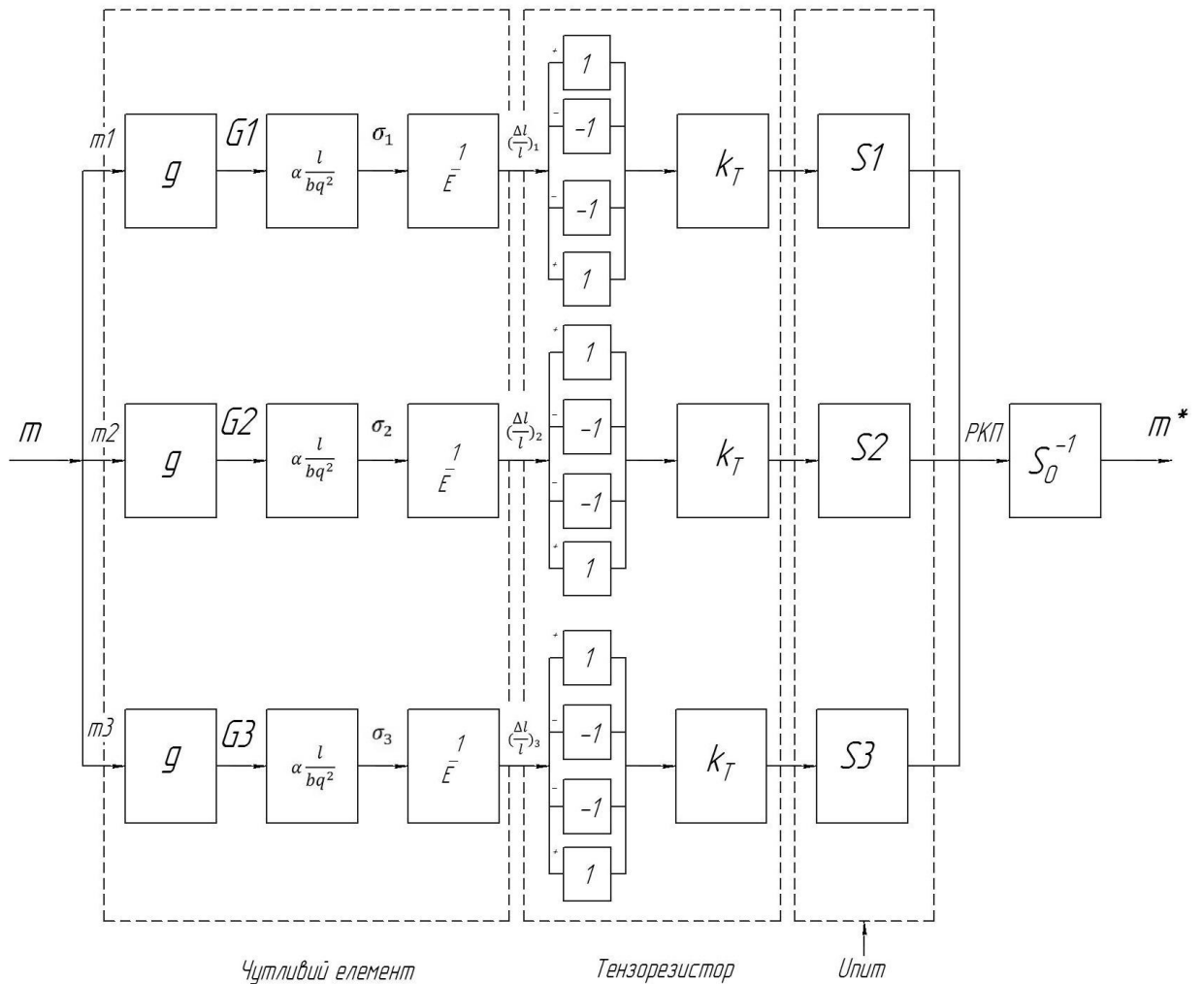


Рисунок 12. Ваговимірювальна система. Схема принципова

- 1 – чутливий елемент;
- 2 – тензорезистор;
- 3 – суматор;
- 4 – вимірювальний ланцюг.

2.2 Розробка електричної схеми

У тензорезисторних перетворювачах для вимірювання неелектричних величин найбільшого поширення набули два різновиди електричних ланцюгів: ланцюг дільника напруги (рисунок 13, а) і мостовий ланцюг (рисунок 13, б), причому під впливом вимірюваної величини змінюється або один опір плеча дільника напруги або мостового

ланцюга, або два, або всі чотири (для мостового ланцюга). У загальному випадку опори плечей ланцюга можуть бути як активними, так і реактивними.

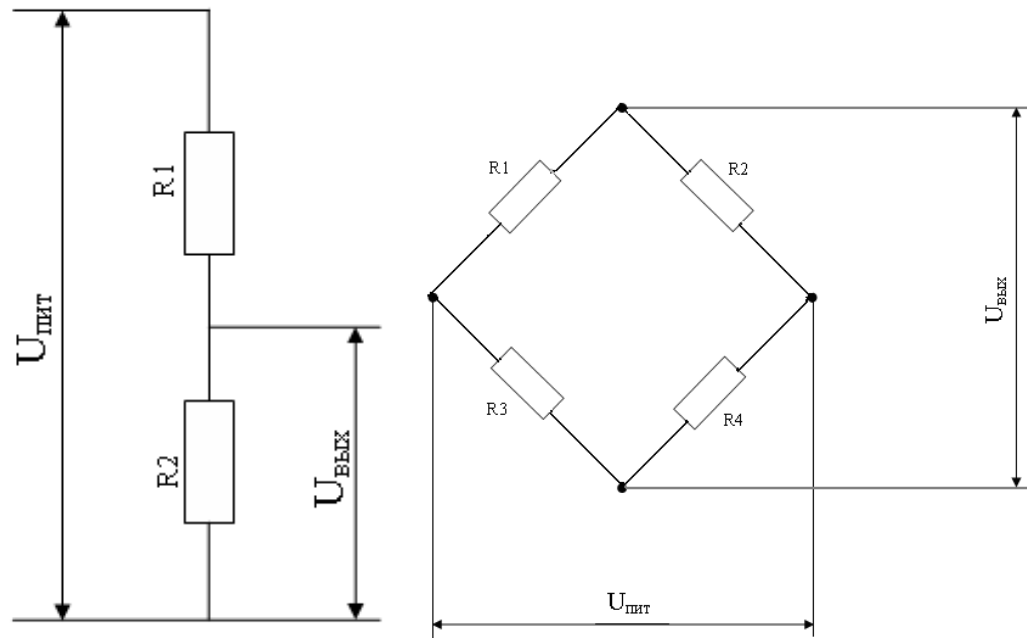


Рисунок 13. Електричний ланцюг тензорезисторного перетворювача:

а – ланцюг ділення напруги; б – мостовий ланцюг

За кількістю опорів, що змінюються під впливом вимірюваної величини поділяються на ланцюги з одним робочим плечем, з двома і з чотирма робочими плечима.

Мостові ланцюги з чотирма рівними робочими плечима, опору яких в суміжних плечах відчувають деформації різних знаків, краще з точки зору підвищення метрологічних і експлуатаційних характеристик (чутливість, нелінійність, температурна стабільність, споживана енергія).

У разі, коли мостовий ланцюг з чотирма рівними робочими плечима, під дією вимірюваної величини опору R_1 і R_4 збільшуються на $R_1\varepsilon_1$ і $R_4\varepsilon_4$ відповідно, а опору R_2 і R_3 - зменшуються на $R_2\varepsilon_2$ і $R_3\varepsilon_3$, величина вихідного сигналу:

$$U_{\text{вых}} = U \cdot \frac{R_1 \cdot (1 + \varepsilon_1) \cdot R_4 \cdot (1 + \varepsilon_4) - R_2 \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot R_3 \cdot (1 - \varepsilon_3)}{[R_1 \cdot (1 + \varepsilon_1) + R_2 \cdot (1 - \varepsilon_2)] \cdot [R_3 \cdot (1 - \varepsilon_3) + R_4 \cdot (1 + \varepsilon_4)]} \quad (2)$$

де ε_i - відносна зміна опору плечей вимірювального ланцюга.

Виконуючи поділ чисельника і знаменника на R_2R_4 і перетворення, отримуємо:

$$U_{\text{вих}} = U \cdot \frac{k \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_4 - \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3)}{(k+1) \cdot (k+1+k \cdot \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - k \cdot \varepsilon_3 + \varepsilon_4) + (k \cdot \varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_4 - k \cdot \varepsilon_3)} \quad (3)$$

де $U_{\text{вих}}$ - вихідна напруга вимірювального ланцюга;

$k = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ - коефіцієнт симетрії моста;

R_{1-4} - опір тензорезисторів в плечах моста;

R_1 і R_2 , R_3 і R_4 - опори тензорезисторів в суміжних плечах моста;

ε_{1-4} - відносні зміни опорів тензорезисторів;

$U_{\text{жив}}$ - напруга живлення вимірювального ланцюга.

При $\varepsilon_1 \ll 1$, $\varepsilon_2 \ll 1$, $\varepsilon_3 \ll 1$, $\varepsilon_4 \ll 1$ вираз (3) можна представити таким чином:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{ном}} \cdot \frac{k}{(k+1)^2} \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (4)$$

Чутливість мостової вимірювальної ланцюга:

$$S = U \cdot \frac{k}{(k+1)^2} \quad (5)$$

Збільшення числа робочих плечей в вимірювальній ланцюга збільшує значення вихідного сигналу, але не змінює її чутливість.

Чутливість залежить від значення напруги живлення і співвідношення опорів плечей вимірювального ланцюга і не залежить від значень опорів і числа працюючих плечей. Зі збільшенням напруги живлення вимірювального ланцюга пропорційно збільшується її чутливість. Зі збільшенням коефіцієнта вимірювального ланцюга спочатку збільшується, а потім зменшується. Чутливість ланцюга при $k=1$ максимальна: $S = 0.25 \cdot U_{\text{ном}}$. Зміна k в діапазоні 0,7 ... 1,5 несуттєво позначається на чутливості і призводить до її зменшення всього на 4% в

порівнянні з максимальною. Різке зменшення чутливості вимірювального ланцюга відбувається при $k < 0,4$.

У нашому випадку вимірювальна ланцюг являє собою мостовий ланцюг з чотирма робочими плечима, зображену на рис.

Номінали тензорезисторів вибираємо однаковими в чотирьох плечах і рівними: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 400 \text{ Ом}$. [11]

Тензорезистори вибираємо КФ5Р2 фірми Веда (рис.14).

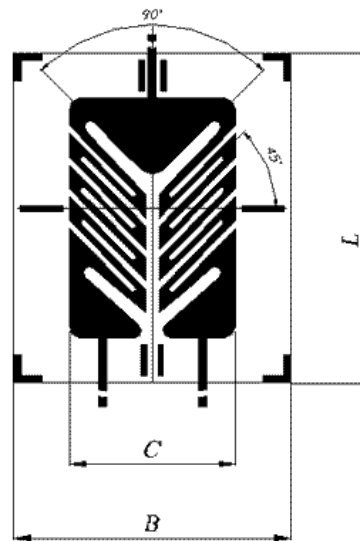


Рисунок 14. Тензорезистор КФ5Р2

У цьому випадку, коефіцієнт симетрії моста максимальний і дорівнює:

$$k = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = 1 \quad (6)$$

Тензорезистори R_1 і R_4 встановлюються на ЧЕ так, що при збільшенні навантаження, яке вимірюють, їх опір збільшується, тобто дані тензорезистори сприймають деформації розтягу, а тензорезистори R_2 і R_3 - так, що при збільшенні навантаження, яке вимірюють, їх опір зменшується, тобто дані тензорезистори сприймають деформації стиску.

Враховуючи що:

$$\epsilon_R = k_T \epsilon \quad (7)$$

функцію перетворення можна записати у вигляді:

$$U_{вих} = U_{num} \frac{k}{(k+1)^2} k_T (\varepsilon_{\tau 1} + \varepsilon_{\tau 2} + \varepsilon_{\tau 3} + \varepsilon_{\tau 4}) \quad (8)$$

де k_T - коефіцієнт тензочутливості ($k_T = 2,1$ для дротяних тензорезисторів);

$\varepsilon_{\tau 1-\tau 4}$ - зсувні деформації, що виникають в балках ЧЕ при впливі навантаження, яке вимірюють.

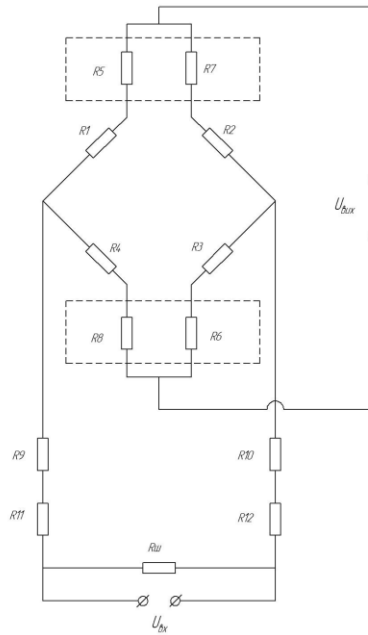


Рисунок 15. Реальний вимірювальний ланцюг тензорезисторного перетворювача

R_1, R_2, R_3, R_4 – тензорезистори; R_5, R_7 – ПНФ (мідний); R_6, R_8 – ПНФ (константановий); R_9, R_{10} – ПНФ для компенсації зміни модуля пружності; R_{11}, R_{12} – ПНФ призначений для корекції вихідного сигналу; $R_{ш}$ – шунтуючий тензорезистор; $U_{вх}$ – напруга на вході; $U_{вих}$ – напруга на виході.[15]

Допустимо, що деформації балок ЧЕ однакові. Тоді $|\varepsilon_{\tau 1}| = |\varepsilon_{\tau 2}| = |\varepsilon_{\tau 3}| = |\varepsilon_{\tau 4}| = \varepsilon_{\tau}$ та $k = 1$. Функцію перетворення можна записати наступним чином:

$$U_{вих} = U_{num} \frac{k}{(k+1)^2} k_T 4\varepsilon_{\tau} \quad (9)$$

ε_τ визначається по закону Гука:

$$\varepsilon_\tau = \frac{\tau}{2G} \quad (10)$$

де G - модуль пружності другого порядку, який визначається за формулою:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (11)$$

де E - модуль Юнга;

μ - коефіцієнт Пуассона, $\mu = 0.3$;

τ - дотичне напруження, яке визначається за формулою Журавського:

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{Q}{bh} \quad (12)$$

де Q - вимірювана навантаження, $Q = P_n \cdot 9,8 \text{ м/с}^2$;

b - висота полочки;

h - ширина полочки.

З огляду на все вище перераховані співвідношення формулу () запишемо у вигляді:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{нм}} \frac{k}{(k+1)^2} k_T \frac{2}{3} \frac{Q}{Ebh} \quad (13)$$

Опір робочого плеча змінюється під дією температури, яка призводить до зміни початкового рівня вихідного напруги вимірювального ланцюга, тому виникає температурна зміна початкового коефіцієнта передачі (далі НКП). Для компенсації цього впливу в мостову схему підключаються компенсаційні перетворювачі.[18]

Резистори балансування ПНФ-Б, які відповідно підключені в плечі з опорами R_1 і R_2 служать для підгонки початкового розбаланса вимірювального ланцюга, нормування НКП.

Резистори балансування ПНФ-1Т, які підключені в плечі з опорами R_1 і R_2 служать для компенсації температурного зміни начального коефіцієнта передачі (далі НКП).

Робота перетворювачів ПНФ-С і ПНФ-2Т в схемі датчика полягає в тому, що включення їх секцій змінює напруга живлення на вхідний діагоналі моста, що нормує робочий коефіцієнт передачі (РКП) і його температурні зміни.

За конструкцією ПНФ є чутливий елемент з фольги, запресований з підкладкою з ізоляційного матеріалу і закритий зверху захисною плівкою.

При нормуванні параметрів шини розрізаються і опір перетворювача збільшується на величину, яка дорівнює сумі опорів включених секцій. Це призводить до зміни відповідного параметра тензорезисторного датчика.

3. Розрахунок основних характеристик перетворювача

3.1 Розрахунок статичної характеристики

Статична характеристика - залежність зміни вихідної величини від зміни вхідної величини у встановленому режимі.

Для тензорезисторного датчика вона буде мати вигляд $U_{вих} = f(Q)$. Функція перетворення є статичною характеристикою датчика:

$$U_{вих} = U_{nut} \frac{k}{(k+1)^2} k_T \frac{2}{3} \frac{Q}{ES} \quad (14)$$

З формули маємо, що між вхідною та вихідною величиною існує лінійна залежність. Графік статичної характеристики зображено на рисунку 16.

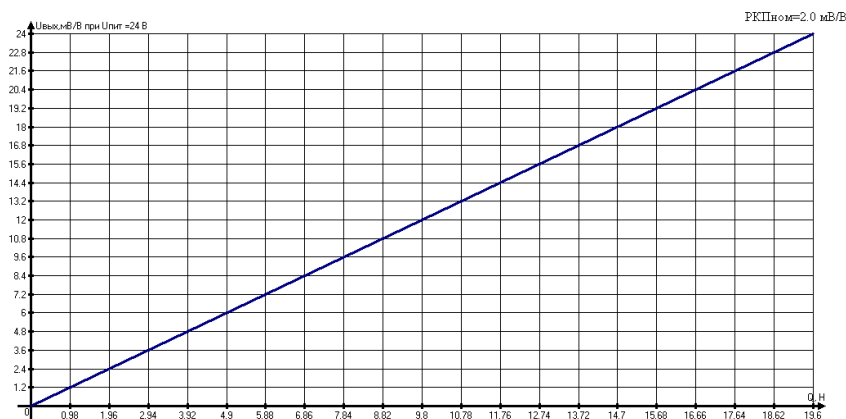


Рисунок 16. Статична характеристика

3.2 Розрахунок динамічної характеристики

Динамічні характеристики засобів вимірювань нормуються і визначаються відповідно до ГОСТ 8.256.77. - "Нормування і визначення динамічних характеристик аналогових засобів вимірювань".

Динамічні характеристики поділяються на повні і окремі.

Повної динамічною характеристикою називається характеристика, що однозначно визначає зміну вихідного сигналу при будь-яких змінах інформативного і неінформативного параметрів вхідного сигналу і впливає величини.

Окремою динамічною характеристикою називається функція або параметр повної динамічної характеристики, наприклад смуга пропускання, загасання, час встановлення вихідного сигналу та ін. Повними динамічними характеристиками є: диференціальне рівняння, імпульсна характеристика $h_1(t)$, перехідна характеристика $h(t)$, передаточна функція $W(p)$, сукупність амплітудно-частотних $A(\omega)$ і фазо-частотних $\varphi(\omega)$ характеристик.

Частотними динамічними характеристиками є: окремі параметри повних динамічних характеристик, наприклад постійна часу, час запізнювання, а також характеристики, які лише частково характеризують динамічні властивості засобів вимірювань, наприклад час встановлення вихідного сигналу.

Дана конструкція тензорезисторного перетворювача ваги включає в себе пружний елемент у вигляді балки (рис.). Осьове зусилля, яке вимірюється, $Q(t) = Q_m \cos \omega t$ через перехідну деталь, яка не деформується масою M передається чутливому елементу, у вигляді прямого стрижня, і викликає його поздовжні і поперечні деформації.[20]

Для спрощення розрахунку, схему пружного елемента приймаємо наступною (рис. 17):

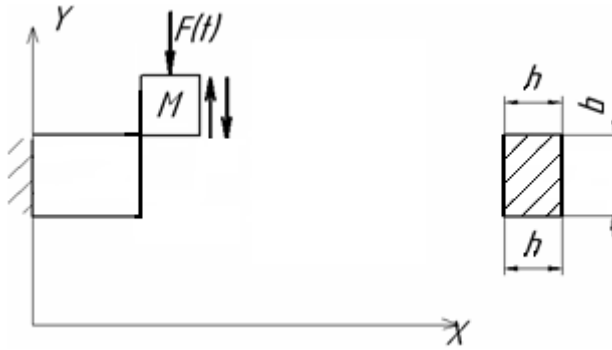


Рисунок 17. Схема пружного елемента

Осьове зусилля $Q(t) = Q_m \cos \omega \cdot t$ через платформу викликає поперечні коливання силівимірювальний зсувний датчика, на верхній і нижній площинах чутливого елемента якого поміщаються тензорезистори. Під дією навантаження верхні тензорезистори відчують деформацію розтягування, нижні - таку ж за величиною деформацію стиску.

Балка має довжину l , товщину h , ширину b , модуль пружності E , щільність матеріалу ρ .

Поперечні коливання балки описуються диференціальним рівнянням [2]:

$$\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \frac{m}{EJ} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (15)$$

де $y(x,t)$ - поперечне зміщення точки на осі балки від положення рівноваги;

m - погонна маса;

$J = \frac{bh^3}{12}$ - момент інерції поперечного перерізу балки щодо його осі,

що проходить через центр ваги перпендикулярно напрямку згину.

Функція згинів $y(x,t)$ без урахування демпфування може бути представлена у вигляді $y(x,t) = y(x) \cos \omega t$, де форма коливань $y(x)$ визначається виразом

$$y(x) = B_1 \cosh kx + B_2 \cos kx + B_3 \sinh kx + B_4 \sin kx \quad (16)$$

Де k та ω пов'язані співвідношенням $k = \sqrt{m\omega^2 E^{-1} J^{-1}}$

Постійні інтегрування $B_1 - B_4$ визначаються з наступних граничних умов.

1) Для жорстко зацімленого кінця $x = 0$ маємо

$$y(x) = 0 \text{ и } \frac{dy(x)}{dx} = 0 \quad (17)$$

2) На вільному кінці $x = l$ відсутній згинний момент

$$EJ \frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2} = 0 \text{ или } \frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2} = 0 \quad (18)$$

3) Використовується рівняння руху загальної маси деталей 1 та 2 відповідно принципу Даламбера

$$Q(t) - M \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \Big|_{x=l} + EJ \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^3} \Big|_{x=l} = 0 \quad (19)$$

Де 2 та 3 доданок лівої частини силу інерції та силу пружного опору 4 балок.

Визначив постійні інтегрування, знайдемо формулу поперечних коливань балки.

$$y(x) = \frac{2Q_m [T(kl)U(kx) - S(kl)V(kx)]}{EJk^3 E(kl) - M\omega^2 B(kl)}$$

$$\text{Де } T(kl) = \frac{1}{2} (shkl + \sin kl);$$

$$S(kl) = \frac{1}{2} (chkl + \cos kl);$$

$$U(kl) = \frac{1}{2} (chkx - \cos kx);$$

$$V(kx) = \frac{1}{2} (shkx - \sin kx);$$

$$B(kl) = chkl \sin kl - shkl \cos kl;$$

$$E(kl) = 1 + chkl \cos kl.$$

Відносна деформація поверхневих слоїв балки визначається

$$\varepsilon(x) = \pm \frac{h}{2} \cdot \frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2} \quad (20)$$

Або з урахуванням формули

$$\varepsilon(x) = \pm \frac{Q h k^2 [T(kl)S(kx) - S(kl)T(kx)]}{E J k^3 E(kl) - M \omega^2 B(kl)} \quad (21)$$

Де верхній знак відповідає деформації розтягу, а нижній – деформації стиску.

Використовуючи співвідношення $\sigma(x) = E\varepsilon(x)$ знайдемо напруженість на поверхні балки

$$\sigma(x) = \pm \frac{Q_m E h k^2 [T(kl)S(kx) - S(kl)T(kx)]}{E J k^3 E(kl) - M \omega^2 B(kl)} \quad (22)$$

Максимальна напруженість

$$\sigma_{\max}(x) = \pm \frac{Q_m E h k^2 \gamma(kl)}{E J k^3 E(kl) - M \omega^2 B(kl)} \quad (23)$$

Величина не повинна перевищувати межі пропорційності σ_{np} для матеріалу балок

Середня відносна деформація балки на відрізьку розташування тензорезисторів визначається наступним чином

$$\varepsilon_{cp} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \varepsilon(x) dx = \pm \frac{h}{2(x_2 - x_1)} \left[\frac{\partial y(x)}{\partial x} \right]_{x_1}^{x_2} \quad (24)$$

Та після перетворень отримаємо

$$\varepsilon_{cp} = \pm \frac{Q_m h k [T(kl)T(kx) - S(kl)U(kx)]_{x_1}^{x_2}}{(x_2 - x_1) [E J k^3 E(kl) - M \omega^2 B(kl)]} \quad (25)$$

Формула є функцією перетворення пружної системи в динамічному режимі. Якщо $\omega = 0$, то отримаємо співвідношення для статичного режиму вимірювань.

Отриманий вираз для статичного згину балки

$$y(x) = \frac{Q(3x^2l - x^3)}{6EJ} \quad (26)$$

Використовуючи яке знайдемо відносну деформацію та напруженість на поверхні балки

$$\varepsilon(x) = \pm \frac{Qh(l-x)}{2EJ};$$

$$\sigma(x) = \pm \frac{Qh(l-x)}{2J};$$

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{Ehl}{2J}.$$

Середня відносна деформація балки на відрізок розподілу тензорезисторів визначається з виразу

$$\varepsilon_{cp} = \pm \frac{Qhl}{2EJ} \left(l - \frac{x_1 + x_2}{2l} \right)$$

Що представляє собою функцію перетворення пружно системи в статичному режимі.

Амплітудо-частотна характеристика пружної системи

$$K(\omega) = \frac{|\varepsilon_{cp}|}{Q_m} = \frac{hk \left[7(kl)I(kx) - S(kl)U(kx) \right]_{x_1}^{x_2}}{\left[EJk^2 E(kl) - M\omega B(kl) \right] (x_2 - x_1)} \quad (27)$$

та при $\omega \ll \omega_0$ маємо вигляд

$$K(\omega) \approx \frac{hl}{2} \cdot \frac{1 - \frac{x_1 - x_2}{2l}}{EJ - \left(\frac{M}{3} + \frac{M_{\delta}}{2} \right) \omega^2 l^3} \quad (28)$$

де $M_{\delta} = ml$ – маса однієї балки.

При $\omega = 0$ отримаємо значення статичного коефіцієнта передачі

$$K_0 = \frac{hl}{2EJ} \left(1 - \frac{x_1 - x_2}{2l} \right).$$

Власні частоти коливань пружної системи

$$EJk^3 E(kl) - M\omega^2 B(kl) = 0$$

А приблизне значення основної частоти коливань, знайденого по методу Релея-Рітца

$$\omega_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{12EJ}{\left(M + \frac{33}{35} M_{\delta} \right) l^3}} \quad (29)$$

Основна частота зростає при збільшенні жорсткості балки EJ та при зменшенні довжини l та маси пружної системи. Істотно впливає на частоту ω_0 довжина балки, тому при проектуванні пружної системи слід обирати тензорезистори з малою базою, від якої істотно залежить величина l .

Для вибору параметрів b та h поперечного зрізу балки виконується умова $\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_{np}}{k_3}$, де σ_{np} - межа пропорційності матеріалу.

Підставляючи в цю нерівність значення σ_{\max} з формули () для статичного режиму, отримаємо

$$\frac{Qhl}{8J} = \frac{3Ql}{2bh^2} \leq \frac{\sigma_{np}}{k_3}$$

звідки при відомій довжині l матимемо

$$bh^2 = \frac{3Qlk_3}{2\sigma_{np}}$$

Ширина балки b залежить від поперечних розмірів тензорезистора. Поставивши собі за величиною b , знайдемо

$$h = \sqrt{\frac{3Qlk_3}{2\sigma_{np}b}}$$

Це значення необхідно уточнити по формулі (), яка дає більше, ніж в статистиці, напругу σ_{\max} .

Якщо вимірюється зусилля містить постійну і змінну складові, то для уточнення величини h використовується співвідношення

$$\sigma_{\max} = \frac{Qhl}{8J} + \frac{Q_m E h k^2 T(kl)}{E J k^3 E(kl) - M \omega^2 B(kl)} \leq \frac{\sigma_{np}}{k^3}$$

Зауважимо, що якщо зосереджена маса набагато менше маси балок, то формула () для основної частоти коливань приймає вид

$$\omega_0 \cong \sqrt{\frac{140EJ}{11M_0 l^3}} = \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{35E}{33\rho}} \quad (30)$$

Аналіз останньої формули показує:

- 1) величина ω_0 в даному випадку не залежить від ширини балки, тому в $bh^2 = const$ доцільно збільшувати другий співмножник за рахунок першого;
- 2) як і в стрижневих системах, для виготовлення елементів пружної системи слід вибирати матеріали з великим співвідношенням E/ρ .

Визначивши величини ω_0 і K_0 , можна записати наближене вираження для АЧХ без урахування демпфірування:

$$K_{np}(\omega) = \frac{K_0}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$$

З огляду на вже підібрані раніше в математичної моделі ваговимірювального комплексу геометричні параметри датчика, що задовольняють вимогам комплексу, за формулою (1.45) визначаємо власну частоту датчика:

- в ненавантаженому стані ($M = 3$ кг, $M_6 = 1,3$ кг):

$$\omega_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{12EJ}{\left(M + \frac{33}{35}M_6\right)l^3}} = 4945,48 \text{ рад/с.}$$

- в навантаженому стані ($M = 41303$ кг, $M_6 = 1,3$ кг):

$$\omega_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{12EJ}{\left(M + \frac{33}{35}M_6\right)l^3}} = 101 \text{ рад/с..}$$

Амплітудно-частотна характеристика являє собою залежність відношень амплітуд вихідного і вхідного синусоїдальних сигналів перетворювача від зміни частоти:

$$A(w) = \frac{1}{\sqrt{(1 - w^2T^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot wT)^2}} \quad (31)$$

Для розрахунку АЧХ ненавантаженого і навантаженого датчика в додатку А наведені програми А.1 і А.2 відповідно.

Графіки амплітудно-частотних характеристик навантаженого і ненавантаженого датчиків представлені на рис.18:

АЧХ

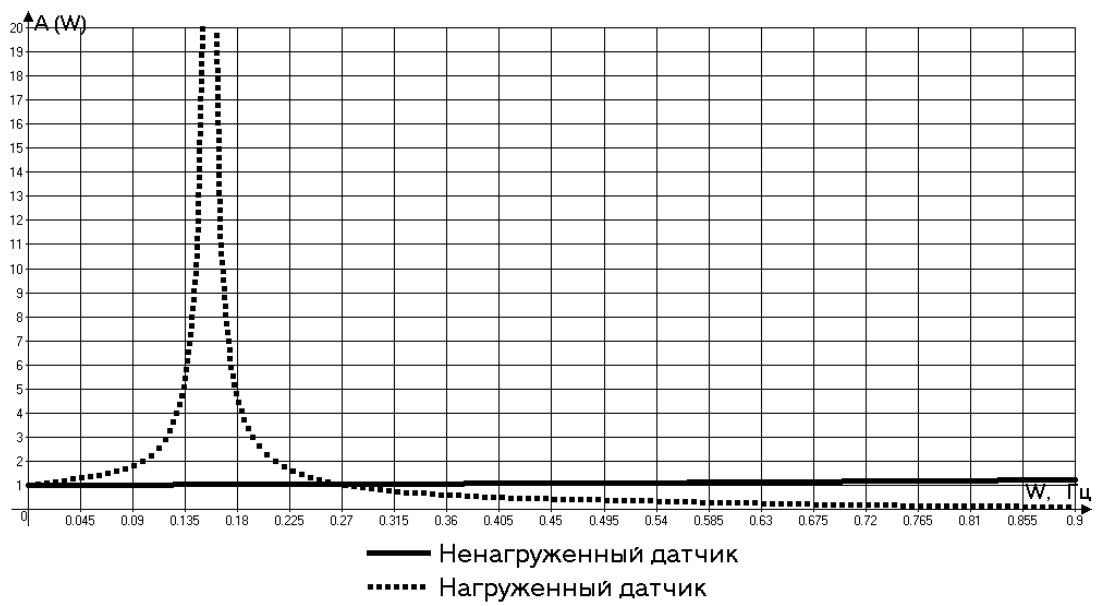


Рисунок 18. Графік АЧХ (на відрізьку 0-900 рад/сек) для навантаженого та ненавантаженого перетворювача

АЧХ



Рисунок 19. Графік АЧХ (на відрізьку 0-30 рад/сек) для навантаженого та ненавантаженого перетворювача

Фазо-частотна характеристика являє собою залежність зсуву по фазі синусоїдального вихідного сигналу по відношенню до фази вхідного синусоїдального сигналу при зміні частоти:

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{2 \cdot \zeta \cdot \omega T}{1 - \omega^2 T^2} \quad (32)$$

Для розрахунку ФЧХ ненавантаженого і навантаженого датчика в додатку А наведені програми А.1 і А.2 відповідно.[9]

Графіки фазо-частотних характеристик навантаженого і ненавантаженого датчиків представлені на рис 20:

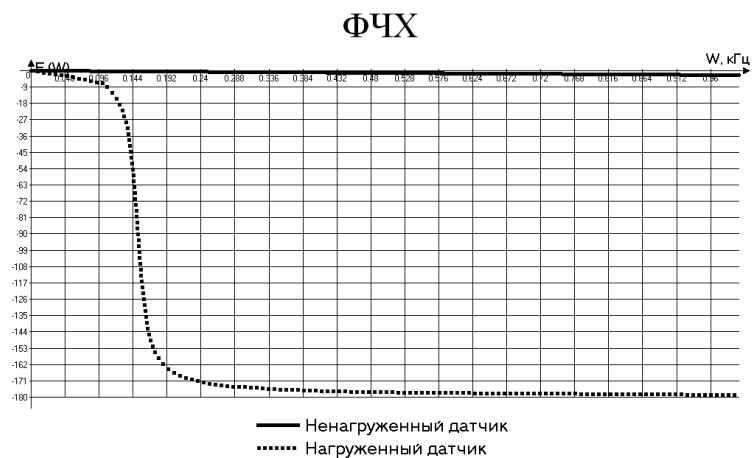


Рисунок 20. Графік ФЧХ (на відрітку 0-1000 рад/сек) для навантаженого та ненавантаженого перетворювача



Рисунок 21. Графік ФЧХ (на відрітку 0-30000 рад/сек) для навантаженого та ненавантаженого перетворювача

Перехідна характеристика $h(t)$ являє собою вихідний сигнал перетворювача, що виникає при подачі на його вхід одиничного ступінчастого сигналу. Знайти перехідну характеристику можна розділивши передаточну функцію $W(p)$ на P і виконавши зворотне перетворення Лапласа:

$$W(p) = \frac{1}{T^2} \frac{1}{p^2 + \frac{2\zeta p}{T} + \frac{1}{T^2}} = \frac{1}{T^2} \frac{1}{p^2 + 2p \frac{\zeta}{T} + \frac{\zeta^2}{T^2} - \frac{\zeta^2}{T^2} + \frac{1}{T^2}} = \frac{1}{T^2 \cdot \left(\left(p + \frac{\zeta}{T} \right)^2 + \frac{1 - \zeta^2}{T^2} \right)}$$

Позначимо $\zeta/T = a$; $(1 - \zeta^2)/T^2 = \lambda^2 \Rightarrow \lambda = \sqrt{\frac{1 - \zeta^2}{T^2}}$;

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\} = \frac{1}{T^2} L^{-1} \left\{ \frac{1}{p \left[\left(p + a^2 \right) + \lambda^2 \right]} \right\} = \frac{1}{T^2} \frac{1}{a^2 + \lambda^2} \left(1 - e^{-at} \left(\cos \lambda t + \frac{a}{\lambda} \sin \lambda t \right) \right) =$$

$$= \frac{1}{T^2} \frac{1}{\frac{\zeta^2}{T^2} + \frac{1 - \zeta^2}{T^2}} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\zeta}{T}t} \cdot \left(\cos \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{T} t + \frac{\zeta}{T} \frac{T}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \sin \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{T} t \right) \right];$$

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{\zeta}{T}t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \cos \left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{T} t + \varphi \right);$$

де $\varphi = \arctg \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$ - початкова фаза

Для розрахунку перехідної характеристики ненавантаженого і навантаженого датчика в додатку А наведена програма А.2.

Результати програми показують, що: час заспокоєння в навантаженому стані $\Delta t_{\text{зас}} = 0,026$ с.

Графік перехідної характеристики навантаженого і ненавантаженого датчика представлений на рис. 22.

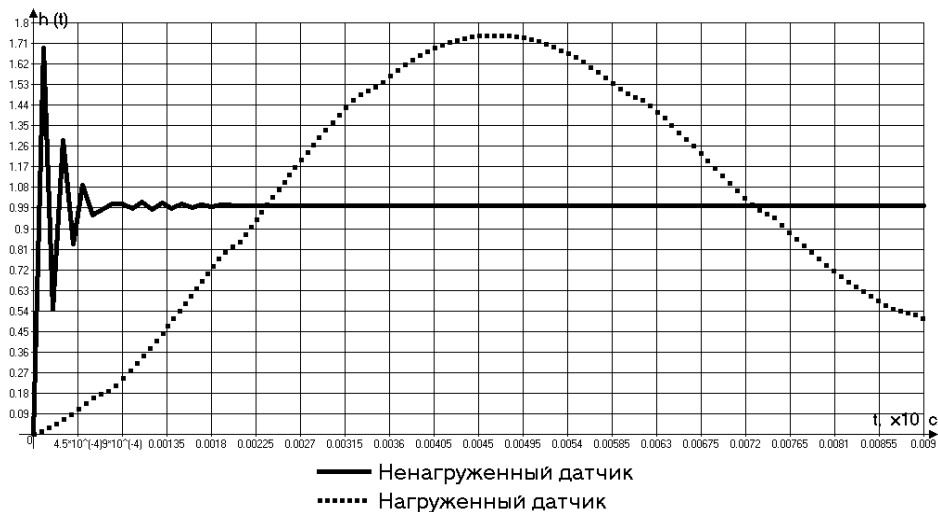


Рисунок.22 – Графік перехідної характеристики

4. Аналіз точності перетворювача

Характеристикою точності перетворювача є основна похибка - найбільш ймовірна похибка перетворювача в заданих (нормальних) експлуатаційних умовах.

Основна похибка перетворювача визначається за формулою:

$$\delta = \sqrt{\lambda^2 + \gamma_n^2 + \gamma_c^2 + \beta^2 + \alpha^2}$$

де λ - нестабільність показань, $\lambda \leq 0.02\%$;

γ_n - нелінійність, $\gamma_n \leq 0.02\%$;

γ_c - гістерезис, $\gamma_c \leq 0.02\%$;

β - температурний коефіцієнт адитивної похибки, $\beta = \pm 0,07\% / 10 \text{ K}$;

α - температурний коефіцієнт мультиплікативної похибки, $\alpha = \pm 0,08\% / 10 \text{ K}$;

Основна похибка датчика:

$$\delta = \sqrt{0.02^2 + 0.02^2 + 0.02^2 + 0.007^2 + 0.008^2} = 0.036\%$$

Додаткова похибка не перевищує сумарну похибка датчика $\delta = 0.036\%$.

Додаткова похибка - зміна похибки засобу вимірювання по відношенню до основної і виникає при відхиленні однієї з величин, що впливають, в

установленому діапазоні від нормальних умов. Додаткова похибка визначається за формулою:

$$\delta_o = \sqrt{(n\beta)^2 + (n\alpha)^2}$$

де n - число градацій температурного діапазону при вимірах проводяться через кожні 10°C , $n = 8$ (тому що номінальний температурний діапазон зазначений в технічному завданні ВІК $(-40 \dots + 60^\circ\text{C})$).

$$\delta_o = \sqrt{(8 \cdot 0.007)^2 + (8 \cdot 0.008)^2} = 0,0085 \, \%$$

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ

Проведено огляд аналогів ваговимірювальних систем. Розроблено структурну та принципову схеми.

Визначено, що основна частота зростає при збільшенні жорсткості балки EJ та при зменшенні довжини l та маси пружної системи. Істотно впливає на частоту ω_0 довжина балки, тому при проектуванні пружної системи слід обирати тензорезистори з малою базою, від якої істотно залежить величина l .

Час заспокоєння в навантаженому стані $\Delta t_{\text{зас}} = 0,026$ с. Похибка датчика $\delta = 0.036\%$, додаткова похибка $\delta_o = 0,0085\%$.

РОЗДІЛ 2. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1.Обґрунтування необхідності проведення теоретичних та експериментальних досліджень реакції пружного елемента на імпульсні навантаження

Вимоги для датчиків згідно ДСТУ EN 45501:2015 [1] визначають найбільшу границю вимірювання датчиків з урахування коригувального коефіцієнта Q , який враховує можливий вплив навантаження поза центром, постійне навантаження від вантажоприймального пристрою, діапазон початкового установлення на нуль і нерівномірність розподілу навантаження. Рекомендації OIML та WELMEC $Q=2$ [2,3] .

Одержані оцінки коефіцієнтів перевантаження обґрунтовують необхідність конструктивних рішень при проектуванні ваг, які плануються до використання в важких умовах експлуатації.

2.1.1.Побудова математичної моделі деформації чутливого елемента при імпульсному впливі

Досліджуваний комплекс складається з ваговимірювальної платформи з вбудованими тензорезисторними датчиками. Ваговимірювальний механізм має конструктивно безвідмовний захист тензодатчиків від ударних навантажень.

Конструкція складається з вантажоприймальної платформи, що спирається на середню раму через демпфуючі пружинні блоки. Пружинні блоки кріпляться на вузли вмонтування тензодатчиків (кульова опора). Тензодатчики розміщуються на нижній рамі ваг.

Динамічні характеристики ваговимірювального комплексу оцінюємо при типовому імпульсному впливі (рис.2.1).

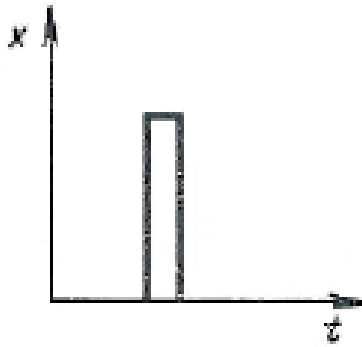


Рисунок 2.1. Імпульсне навантаження

Введемо безрозмірний параметр ξ , ступень заспокоєння [1]:

$$\xi = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{K}{2\sqrt{JC}} ;$$

де $\alpha = \frac{K}{2J}$

ω_0 - власна частота коливань системи (тобто власна частота тензорезисторного перетворювача);

J - момент інерції рухомої системи;

K - коефіцієнт демпфування;

C - жорсткість перетворювача.

Величина параметра ξ істотно впливає на форму перехідного процесу і частотні характеристики системи.[13]

Для визначення перехідної функції спочатку вирішимо характеристичне рівняння і знайдемо його корені (рис.2.2).

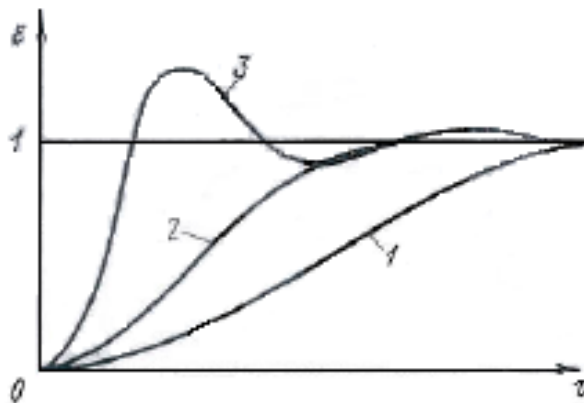


Рисунок 2.2.Графіки перехідних процесів у системі 2-го порядку

З рис. 1.12 випливає, що при $\xi < 1$ процес носить коливальний характер, а при $\xi \geq 1$ - аперіодичний. В окремому випадку, коли відсутнє демпфування ($\xi = 1$), система здійснює незгасаючі коливання.

Так як процес носить коливальний характер, то $\xi < 1$. При цьому корені нерівні, комплексно сполучені:

$$p_1 = -\alpha - j\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = -a - j\omega;$$

$$p_2 = -a + j\omega;$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - a^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}.$$

Перехідна функція

$$\varphi(t) = \frac{Q}{C} \left[1 - e^{-at} \left(\cos \omega t + \frac{a}{\omega} \sin \omega t \right) \right];$$

де Q – питомий крутний момент.

У безрозмірній формі:

$$\varepsilon = \frac{\varphi(t)}{\varphi(\infty)} = 1 - e^{-\xi\tau} \left(\cos \sqrt{1 - \xi^2} \tau + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \sqrt{1 - \xi^2} \tau \right)$$

Одним з важливих критеріїв динамічної якості є тривалість перехідного процесу, яка визначається як час, починаючи з якого крива перехідного процесу не виходить за межі «трубки», кордони якої відрізняються від сталого значення на величину допустимої динамічної помилки (рис. 2.3).

Позначимо відносне значення допустимої помилки через Δ :

$$\Delta = \frac{\Delta\varphi_{\text{доп}}}{\varphi(\infty)}$$

де $\Delta\varphi_{\text{доп}}$ - абсолютне значення допустимої помилки.

При розрахунках зазвичай допускають $\Delta = 0,05 \div 0,1$.

В області $0 < \xi < 1$ існує оптимальне значення ξ , при якому тривалість перехідного процесу при обраному значенні ω_0 буде найменшою.

На рис. суцільною лінією показана крива перехідного процесу, що відповідає значенню, при якому перший максимум кривої збігається з верхньою межею поля допусків, тобто величина перерегулювання (крива 1).

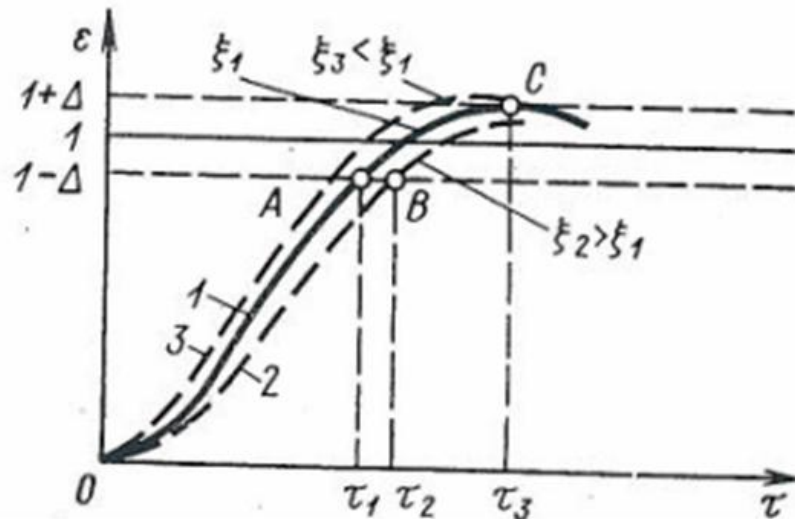


Рисунок 2.3. Перехідний процес

Цією кривої відповідає безрозмірна тривалість перехідного процесу $\tau_{п.п} = \tau_1$, що відповідає точці *A*. При будь-якому як завгодно малому збільшенні ξ період коливань збільшиться і $\tau_{п.п}$ також збільшиться (рис. точку *B*, для якої $\xi_2 > \xi_1$ і $\xi_2 > \xi_1$). При незначному зменшенні ξ в порівнянні з ξ_1 збільшиться величина перерегулювання ($\sigma > \Delta$) і крива 3, побудована для $\xi_3 < \xi_1$ (рис.), перетне верхню межу допуску в точці *C*, для якої $\tau_3 > \tau_1$. Отже, найменше значення $\tau_{п.п} = \tau_1$ матиме місце при оптимальній $\xi_{опт} = \xi_1$.

Для визначення величини $\xi_{опт}$ досить прирівняти $\sigma = \Delta$:

$$\Delta = e^{-\frac{\xi_{опт}^2}{\sqrt{1+\xi_{опт}^2}}}$$

Звідки оптимальний ступінь заспокоєння

$$\xi_{opt} = \frac{\ln \frac{1}{\Delta}}{\sqrt{\ln^2 \frac{1}{\Delta} + \pi^2}}$$

З формули () випливає, що величина ξ_{opt} залежить від величини допуску Δ .[]

Якщо підставити () в рівняння () і прирівняти $\varepsilon = 1 - \Delta$, отримаємо рівняння, що однозначно визначає зв'язок між величиною Δ і мінімальної тривалістю процесу τ_{min} , що відповідає ξ_{opt} . Це рівняння не має явного рішення щодо τ_{min} , але може бути вирішено чисельно.

У табл. 2.1 наведені чисельні значення ξ_{opt} і τ_{min} для різних значень Δ .

Таблиця 2.1 – Оптимальний ступінь заспокоєння ξ_{opt} і мінімальна тривалість перехідного процесу τ_{min} при східчастому впливі

Δ	0	$\pm 0,025$	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,25$
ξ_{opt}	1,0	0,76	0,69	0,59	0,404
τ_{min}	∞	2,83	2,60	2,32	1,95

Дійсна мінімальна тривалість перехідного процесу (в секундах) дорівнює знайденому з таблиці значенням τ_{min} , діленому на ω_0 в 1 / с.

$$t_{min} = \frac{\tau_{min}}{\omega_0}$$

З формули () випливає, що тривалість перехідного процесу теоретично можна необмежено зменшити шляхом збільшення ω_0 .

Наближене значення основної частоти коливань, знайдене за методом Релея – Рітца, це і буде шуканою математичною моделю.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{12EJ}{\left(M + \frac{33}{35}M_6\right)l^3}}$$

2.1.2.Проведення експериментальних досліджень чутливого елемента на імпульсні навантаження

Вибір АЦП для перетворення аналогових сигналів в цифрові, їх зберігання

Розглянуто основні характеристики наступних АЦП (таблиця 2.2):

Таблиця 2.2- Характеристики АЦП

	L-971	L-761	АЦП-ЦАП 16/8	Ацп-ЦАП/32
Частота дискретизації, кГц	400	125	до 20	400
Кількість каналів	16 диференційних или 32 із загальною «землею»	16 диференційних или 32 із загальною «землею»	8 диференціальних	32 синфазних
Посилення	1, 2, 4, 8, 16, 64, 128	1, 2, 4, 8, 16, 64, 128	1, 2, 4, 8, 16	1, 2, 4, 8, 16
Максимальна вхідна напруга при одиничному коефіцієнті підсилення, В	±5	±5	±5	±5

Для дослідження зсувних тензорезисторних датчиків необхідні:

- диференціальні канали;
- частота дискретизації від 200 до 400 кГц;
- посилення 64, 128.

Найбільш доцільним для проведення дослідів є АЦП L-971.

Модуль L-791 призначений для побудови багатоканальних вимірювальних систем збору аналогових даних, а також цифрового управління і контролю стану зовнішніх пристроїв.

Багатоканальний 14-ти розрядний АЦП модуля L-791 дозволяє працювати з 16-ю диференціальними або 32-ма каналами із загальною землею. Кожен з аналогових каналів підключається до АЦП через програмно-керований атенюатори, що дозволяє задавати один з восьми діапазонів вимірювання напруги. Модуль L-791 забезпечує безперервний збір аналогових даних на частотах дискретизації АЦП від 0,005 Гц до 400,0 кГц. Наявність спеціального входу синхронізації дозволяє апаратно синхронізувати моменти старту АЦП.

Цифровий вхід-вихід поданий у вигляді 16 вхідних і 16 вихідних цифрових ТТЛ-спільних ліній. Цифрові висновки за бажанням користувача можуть бути переведені в третій стан.

Двоканальний 12-ти розрядний ЦАП дозволяє виставляти постійну напругу на два незалежні канали.[17]

Для безпосереднього вимірювання сигналів потрібні: сам модуль L-791 без ЦАП і частина роз'єму, яка відходить від АЦП для підключення аналогових сигналів.

На рис. 2.4 зображений вид плати L-791 і показано розташування тільки істотних для конфігурації і підключення елементів.

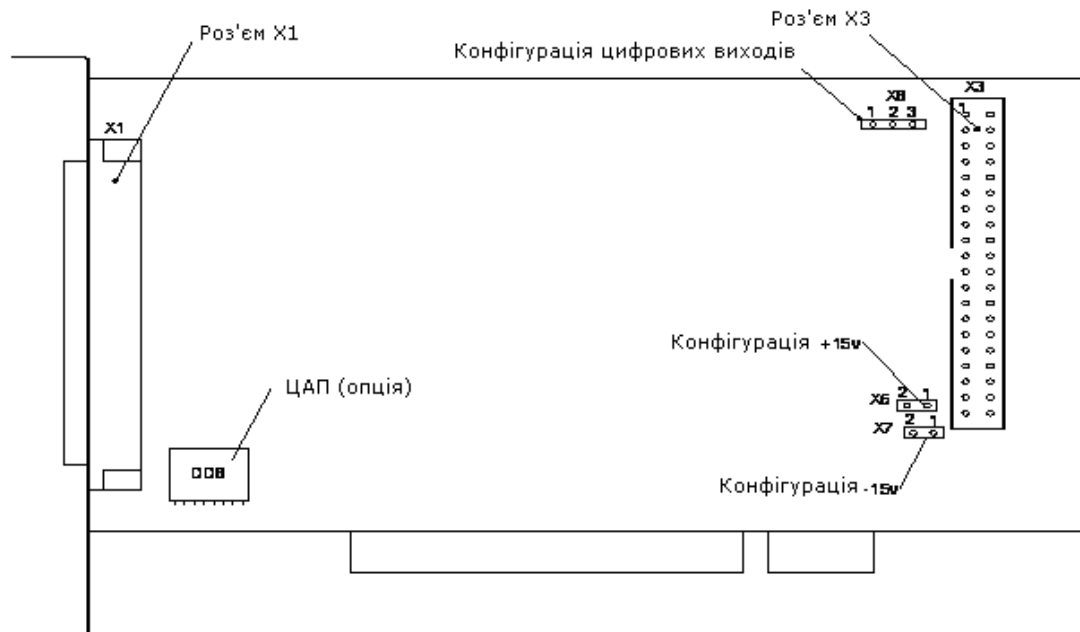


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд L791:

X1 - роз'єм для підключення аналогових ланцюгів;

X3 - роз'єм для підключення цифрових сигналів. Цифрові сигнали виводяться на задню панель РС за допомогою додаткового шлейфу;

X6 - необхідно замкнути джампер для підключення напруги живлення +15 В до висновку 39 роз'єму X3;

X7 - необхідно замкнути джампер для підключення напруги живлення -15 В до висновку 40 роз'єму X3;

X8 - конфігурація виходів DO0-DO15 роз'єму X3:

- замкнуті виходи 1-2 - стан цифрових виходів (Z - стан або активний стан) визначається програмно бітом DO_EN регістра управління, при включенні живлення комп'ютера забезпечується Z-стан;

- замкнуті виходи 2-3 - на цифрових виходах завжди присутні активні рівні TTL, але в момент включення живлення допускається скачок логічного рівня;
- всі виходи розімкнуті - цифрові виходи завжди в Z-стані.

Роз'єм "ANALOG I / O". Тип роз'єму DRB-37M. На рис. 2.5 зображено призначення виходів роз'єму X1

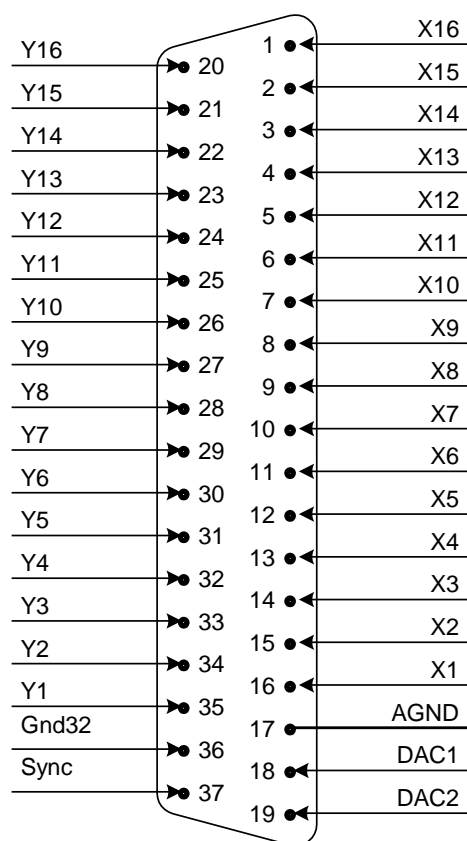


Рисунок 2.5 – Призначення виходів роз'єму X1

Описание сигналов разъема X1 приведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Опис сигналів роз'єму X1 (Analog I/O)

Ім'я сигналу	Спільна точка	Напря м ок	Стан після включення	Опис
1	2	3	4	5
D AC1	AG ND	Вих ід	0V	Вихід каналу 1 ЦАП – вихід напруги ±5В
D AC2	AG ND	Вих ід	0V	Вихід каналу 2 ЦАП - вихід напруги ±5В
A GND				Аналогова земля L791
G ND32	AG ND	Вхі д		В однофазному режимі: загальний інвертується вхід каналів 1-32. У диференціальному режимі повинен бути підключений до AGND
X1 -X16	AG ND	Вхі д		Неінвертуючий вхід напруги каналів 1- 16 для диференціального і однофазного режимів. Невикористані входи X1-X16 рекомендується підключати до AGND
Y1 -Y16	AG ND	Вхі д		Інвертується вхід напруги каналів 1-16 для диференціального режиму, вхід каналів 17-32 для однофазного режиму. Невикористані входи Y1-Y16 рекомендується підключати до AGND
Sy nc	GN D	Вхі д		Вхід зовнішньої синхронізації каналу АЦП.

Вихідний сигнал з датчиків знімається як однофазний сигнал із заземленням.

У всіх датчиків канали з вихідною напругою подаються на виходи L-Card X16 і Y16. Канали, до яких приєднані вхідні і вихідні напруги виводяться на AGND (рис.2.6).[11]

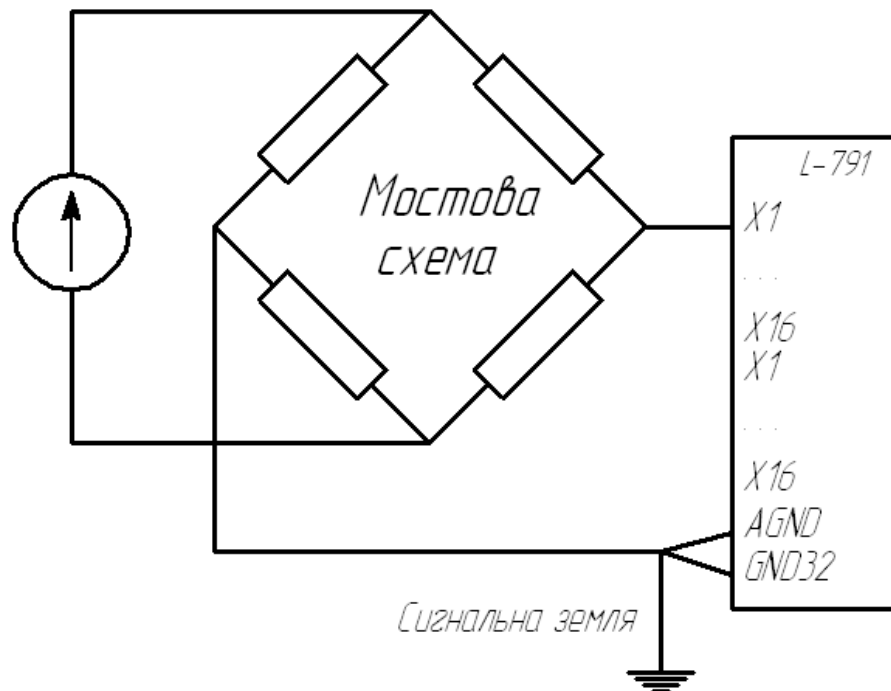


Рисунок 2.6. Канали, до яких приєднані вхідні і вихідні напруги

Вибір програмного забезпечення для обробки сигналу з АЦП

Для ініціалізації отриманої за допомогою L-Card цифрової інформації можна використовувати такі програми, з такими можливостями відображення (табл.2.4):

Таблиця 2.4 - Можливості програмного забезпечення

	«Многоканальний»	L-Graph
Максимальна кількість відліків, одночасно відображених на екрані	250 000	400 000
Кількість одночасно відображених каналів	8	4
Можливості	Запис миттєвих значень відображаються в файл сигналів	

Для відображення знятих характеристик досить 4 каналів, кількість відліків має бути максимальним, тому вибір зупинений на L-Card.

Для обробки вихідних даних потрібна програма, яка могла б працювати з масивом розміром до 400 000 знаків, а так само будувати спектри сигналів.

MATLAB - включає в себе розрахунок, візуалізацію та програмування в зручній середовищі, де завдання вирішуються у близькій до аналітичної формі. Типове використання MATLAB:

- математичне обчислення;
- створення алгоритмів;
- моделювання;
- аналіз даних, дослідження і візуалізація;
- наукова і інженерна графіка.

Обробляє масиви до 10 000 000. Відбирає функцію за значеннями знятих характеристик.

NUMERY

Типове використання NUMERY - це:

- математичне обчислення;

- створення алгоритмів;
- моделювання;
- аналіз даних, дослідження і візуалізація.

Обробляє масиви до 1 000 знаків.

З точки зору вищезазначених особливостей програм, і з огляду на зручність роботи, обрано MATLAB.

L-GRAPH була спеціально розроблена для демонстрації більшості можливостей ряду виробів (в тому числі плати L-791) виробництва компанії ЗАТ "Л-Кард". Фактично програма L-GRAPH представляє собою багатоканальний осцилоскоп-спектроскоп-реєстратор-візуалізатор з досить простим, інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом. Дана програма працює як в 16-ти канальному диференціальному, так і в 32-х канальному із загальною землею режимі підключення вхідних сигналів. Вона дозволяє, зокрема, здійснювати безперервну реєстрацію аналогової інформації в реальному масштабі часу. Тобто, програма L-GRAPH реалізує:

- 4х канальний осцилоскоп;
- 4х канальний спектроскоп;
- багатоканальний збір даних в файл (до 32-м каналам);
- візуалізацію отриманих даних (до 32-м каналам).

Після запуску програма перевіряє наявність АЦП, для введення даних. При його відсутності доступний тільки режим перегляду раніше записаних сигналів.

У головній рядку програми видається відповідне повідомлення.

Вибір режиму роботи програми здійснюється за допомогою головного меню (рис.2.6).

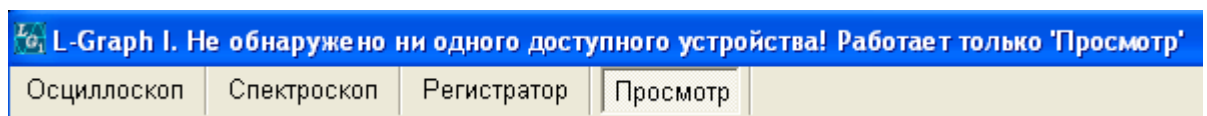


Рисунок 2.6 – Главное меню LGraph

Робота в режимі «Реєстратор»

Щоб записати показання АЦП, потрібно вибрати режим «Реєстратора». У режимі «Реєстратор» допускається запис до 16-ти каналів одночасно.

Для проведеного досвіду потрібно вибрати 1-й канал - №16, відповідно до підключенням L-Card і задати параметри збору даних.

Для цього на панелі «Управління активним каналом» (рис 2.7):

- вимкнути всі канали і включити тільки канал №16;
- активувати номер «Вибір каналу» і задати посилення 128 (рис 2.8).

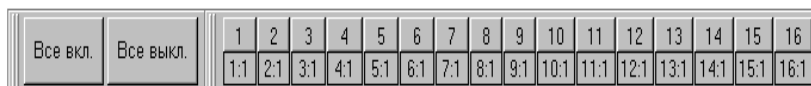
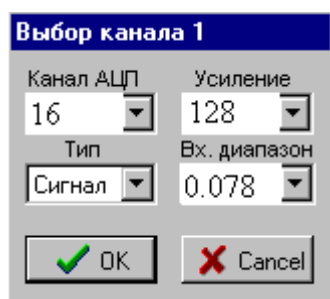


Рисунок 2.8. Вибір каналу

Рисунок 2.7. Управління активним каналом

На панелі «Тимчасова розгортка» задати наступні параметри (рис2.9):

- частота АЦП: 400 кГц;
- міжкадрового затримка: 0,0025 мс;
- частота каналу вираховується автоматично;

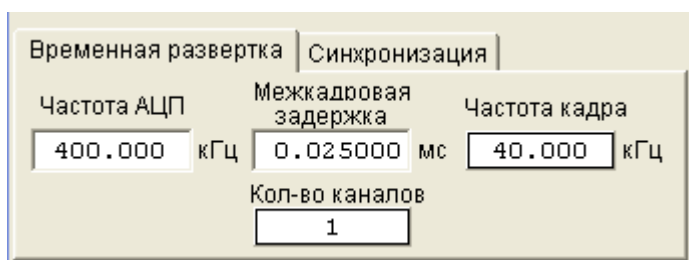


Рисунок 2.9. Параметры тимчасової розгортки

Вікно «Реєстратора» дозволяє встановити наступні параметри:

- загальна кількість відліків 400 000;
- кількість відліків на канал 400 000;

- час збору даних: 1с;
- три безпосередньо пов'язаних параметра (частота АЦП, міжкадрового затримка, частота каналу);
- ім'я вихідного файлу.

У режимі перегляду можна переглянути до 4 каналів одночасно.

На панель настройки візуалізуються параметри поточного файлу даних і задається зсув вісі графіка, а також масштаб в вікні перегляду (рис 2.8).

Панель «Управління активним каналом» дозволяє (рис. 2.10):

- вмикати / вимикати перегляд кожного каналу;
- візуалізує номер фізичної каналу, колір і посилення.

Точні значення за шкалами напруги і відліків визначаються при наведенні курсору на точку на екрані осцилоскопа (рис 2.11), а загальний вигляд вікна в режимі перегляду наведено на рис. 2.12.

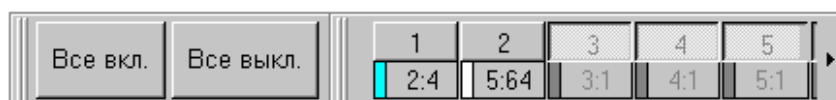


Рисунок 2.10 – Вибір каналу

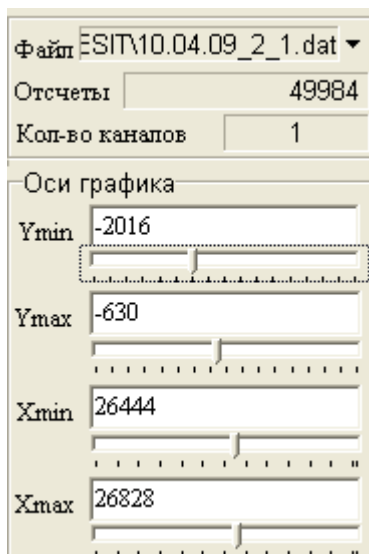


Рисунок 2.11 – Панель
«Управління активним каналом»

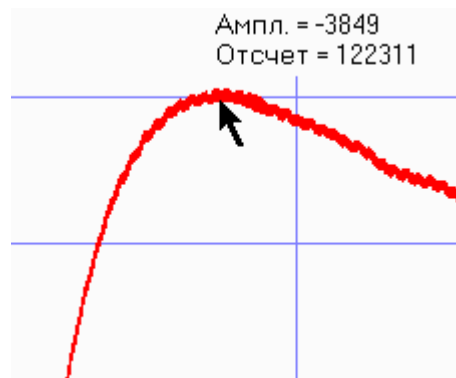


Рисунок 2.12 – Екран осцилоскопа

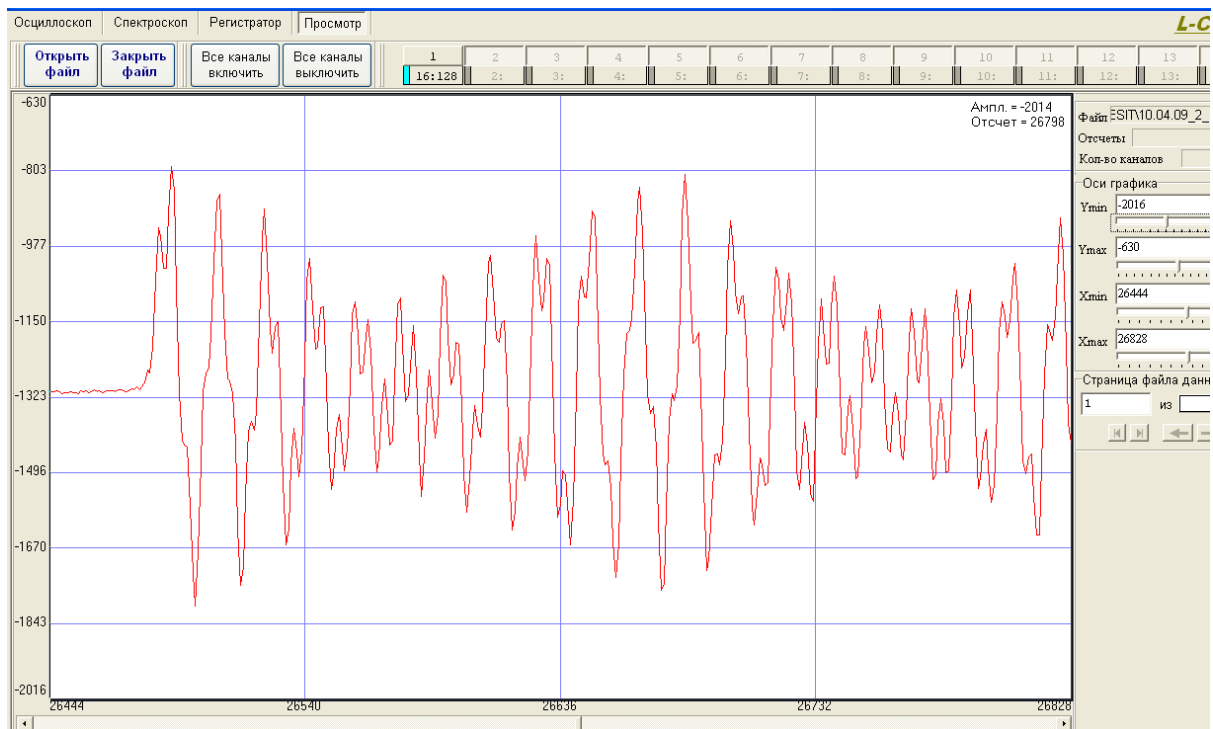


Рисунок 2.13 – Загальний вигляд вікна в режимі перегляду

Розробка експериментальної установки для дослідження власних частот коливань пружних елементів сдвигового типу

Параметри датчиків, динамічні властивості чутливих елементів яких досліджуються в цій роботі, наступні:

1. Датчик зсувний HBM RSCBC3

- номінальне навантаження: 1т;
- частота власних коливань: 2500 Гц;
- опір харчування: 350 Ом;
- вихідний опір: 380 Ом;
- напруга живлення: 12,5 В.

2. Датчик зсувний ПТВ S1P68

- номінальне навантаження: 1т;
- частота власних коливань 2400 Гц;
- опір харчування: 380 Ом;

- вихідний опір: 402 Ом;
- напруга живлення: 12,47 В.

3. Датчик зсувний ESIT

- номінальне навантаження: 20т;
- частота власних коливань: 22000 Гц;
- опір харчування: 365 Ом;
- вихідний опір: 400 Ом;
- напруга живлення: 12,47 В.

Як експериментів заплановано проведення дослідження перехідного процесу кожного датчика під дією разового імпульсного удару.

У ролі разового імпульсного удару буде виступати удар сталевим кулькою з певної висоти. На виході отримаємо перехідний процес, частота загасання якого буде дорівнює власній частоті коливань пружного елемента. Сила удару на частоту не впливає. Вихідний сигнал при цьому легко піддається обробці. Сама установка досить проста (рис 2.14).[15]

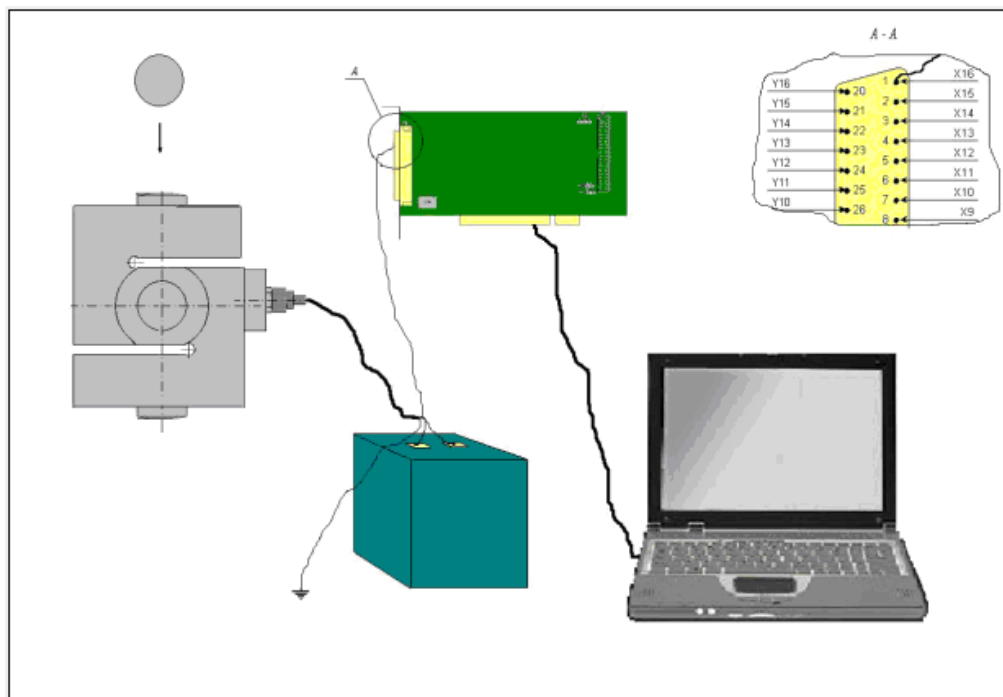


Рисунок 2.14 – Схема стенду експериментальної установки

Разовий імпульсний удар відтворюється кулькою масою 0,2 кг.

Шарик кидається з висоти 0,3 м на силоприймаючу частина датчика. Датчик зсувного типу не закріплюється біля основи, так як його маса не дає їм можливості пересуватися.

Вхід датчиків прикріплений до акумулятора CSB Battery GP1245, який живить мостову схему датчика напругою 12В (рис 2.15).[8]

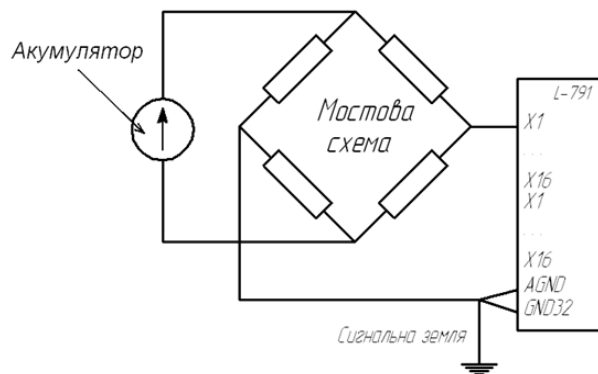


Рисунок 2.15 – Схема підключення сигналів с датчика на плату

Проведення досліджень власних частот коливань чутливих елементів сдвигового типу

Для проведення експериментів був використаний описаний вище принцип.

Досліди проводилися з трьома тензорезисторний датчиками зсувного типу:

- датчик тензорезисторний HBM RSCBC3 з чутливим елементом зсувного типу, розрахований на номінальне навантаження 1000 кг, з РКП 2мВ / В;
- датчик тензорезисторний ПТВ S1P68 з чутливим елементом зсувного типу, розрахований на номінальне навантаження 1000 кг, з РКП 2мВ / В;
- датчик тензорезисторний ESIT з чутливим елементом зсувного типу, розрахований на номінальне навантаження 20 000 кг, з РКП 2мВ / В;

Використовуються при цьому елементи демпфірування:

- гумова пластина 1Ф-1-АМС-С-5 квадратної форми розміром (150x150мм), товщиною 5мм з середньою ступенем твердості (далі згадується як гума №1);
- амортизатор круглий діаметром 100мм;
- пластини металеві, 5 штук вагою 10 кг кожна та 4 штуки вагою 2,5 кг кожна.

Експерименти тензорезисторних датчиків проводилися в навантаженому і ненавантаженому станах з наявністю і без демпфуючих елементів.

Також для оцінки амплітуди перехідного процесу датчика були проведені експерименти, під час яких кулька кидався з висоти з метою аналізу величини амплітуди перехідного процесу.

Дані, отримані в результаті проведення експериментів, були опрацьовані способами, описаними в пункті 2.3, а результати наведені в додатку В.

Обробка та аналіз отриманих експериментальних даних

Розробка алгоритмів обробки результатів експериментальних досліджень в MatLab

Конвертовані з L-Graph файли є текстовими документами, з якими можна працювати як з масивами в програмі MatLab. Для цього використовується спеціальна програма Matrix, яка трансформує і записує дані в файл з розширенням * .mat.

Вікно запуску програми показано на рис. 2.16:

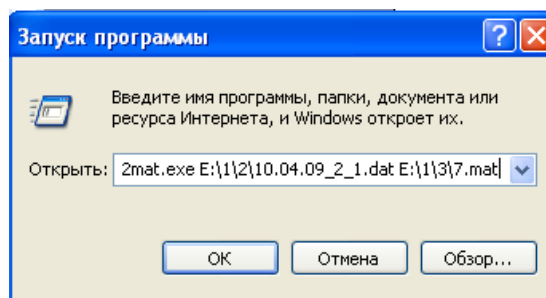


Рисунок 2.16 – Вікно запуску програми Matrix

Обробка даних експериментів для оцінки власної частоти тензорезисторного датчика з пружним елементом проходить наступним чином.

Відкриваємо програму MatLab.

Імпортуємо конвертовані дані: File> Import Data (ім'я файлу).

В результаті отримуємо масив «ім'я файлу» розміром [1: K], де K - кількість відліків, яке зробило АЦП за період тієї частини перехідного процесу, яка була задана при зборі вимірювань, а кожен член масиву - амплітуда вихідного сигналу, яка зареєструвала АЦП . Для побудови графіка необхідно задати вісь абсцис - вісь часу, з кроком 1 масивом t.

В MatLab цей алгоритм буде мати наступний вигляд (рис 2.17):

```
U1_1=U1(240457:242957);  
t1=0:1:2500;  
plot(t1,U1_1);
```

Рисунок 2.17 – Алгоритм MathLab для завдання меж масиву осі абсцис і візуалізації перехідного процесу

Для візуального перегляду масиву необхідно запустити команду plot (ім'я масиву, ім'я масиву), попередньо поставивши його необхідні межі (рис 2.18).

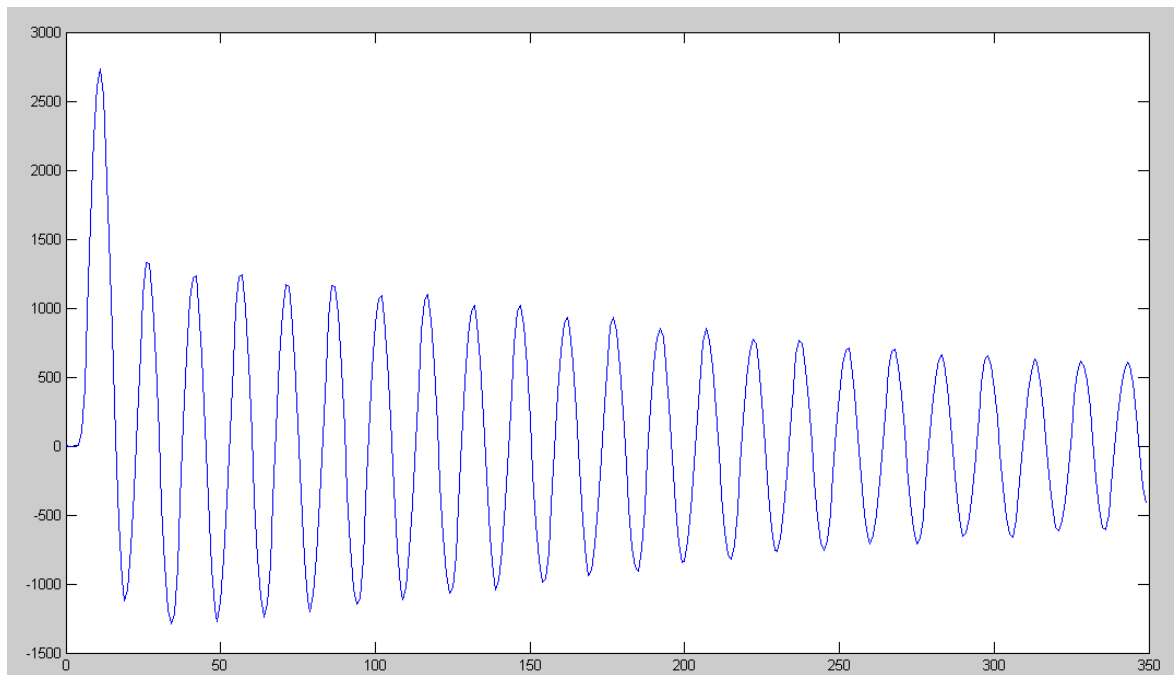


Рисунок 2.18 – Візуалізація перехідного процесу

Часові межі вибірки масиву визначаються в L-Graph, коли проводиться збір інформації про сигнал. Відстань між двома сусідніми поділками (міжкадрового затримка) становить $\Delta t = 2,5 \cdot 10^{-6}$ с.

Щоб оцінити власну частоту перехідного процесу пружного елемента, необхідно побудувати спектр отриманого сигналу. Для цього розкладемо заданий сигнал $U(t)$ в ряд Фур'є.

В MatLab цей алгоритм буде мати наступний вигляд (рисунок 2.19):

```
F=fft(U1_1);
f=0:1/2500:1/1;
S=abs(F);
stem(f,S);
```

Рисунок 2.19 – Алгоритм MathLab для розкладання масиву в ряд Фур'є і візуалізації спектру

А сам графік перетворюється, як показано на рис. 2.20. Його візуалізація відбувається при написанні команди `stem` (ім'я масиву, ім'я масиву) в командному рядку.

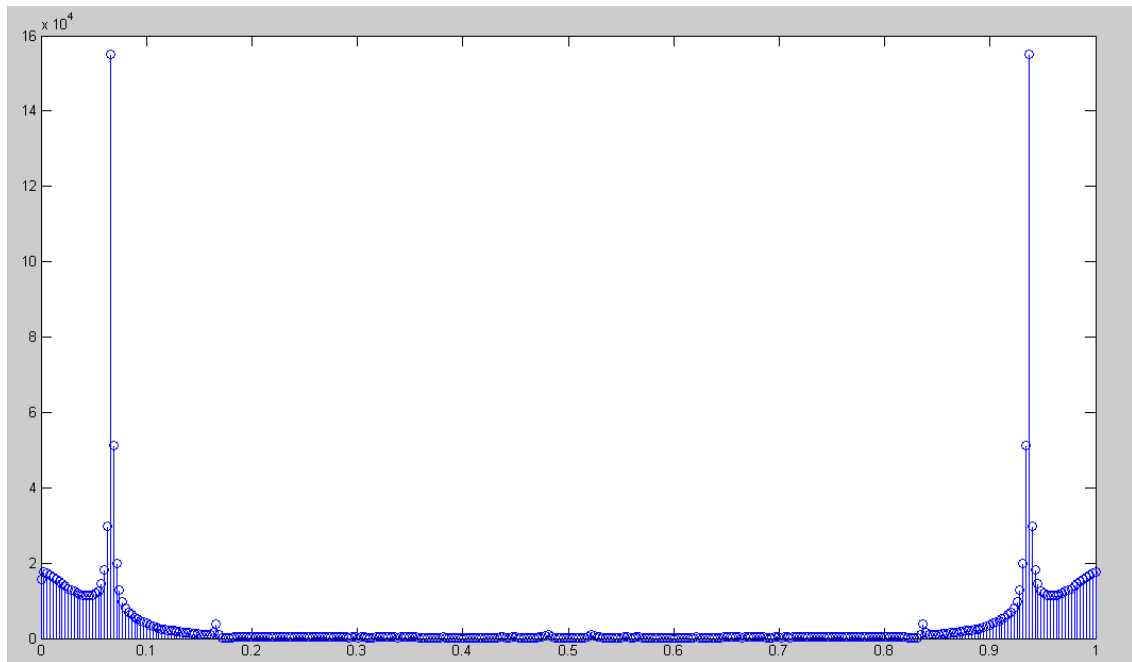


Рисунок 2.20 – Візуалізація спектра

Тут по осі абсцис показана частота коливань системи f . Вісь ординат представлена у вигляді залежності функції $S(f)$.

Алгоритм обробки результатів експериментів в програмному пакеті L-Graph).

Алгоритм обробки результатів експериментів в програмному пакеті L-Graph має наступну послідовність.

Відкрити в L-Graph файл з розширенням *.par, в якому записані дані експерименту (Файл → Імпорт → ім'я файла.dat).

Після того, як на екрані з'явиться перехідний процес, за допомогою лупи (Вид → Лупа) вибрати кордону блоку на початку перехідного процесу (рис 2.21). Визначити рамки початкової амплітуди перехідного процесу за допомогою курсорів.

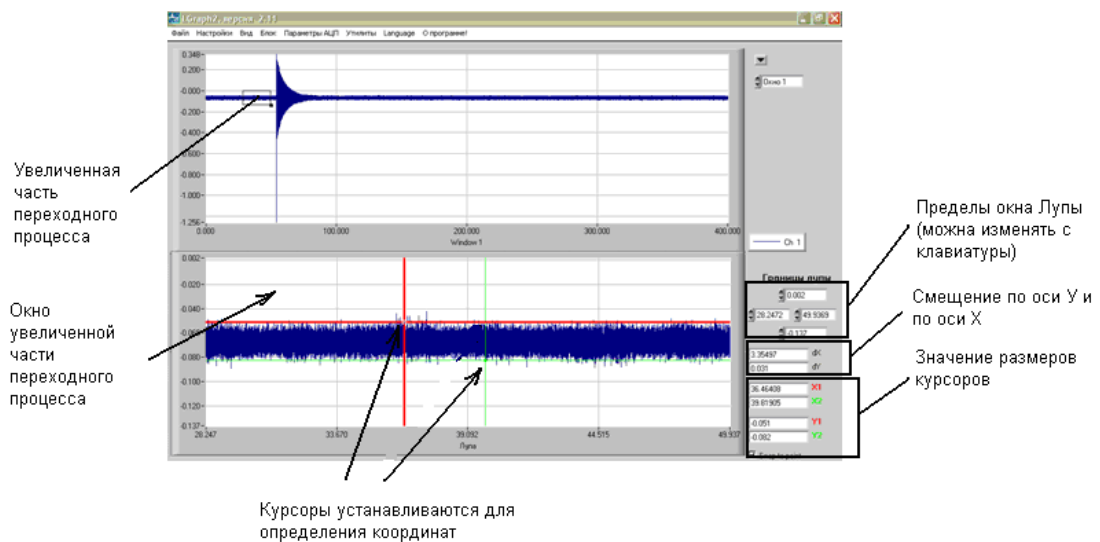


Рисунок 2.21 – Вікно L-Graph2

Так само виділити «лупою» частина перехідного процесу, де безпосередньо починається коливання і визначити межі максимальної амплітуди, коли безпосередньо відбувається контакт маси з датчиком (рисунок 2.22), межі середньої амплітуди, коли починається процес загасання (рис.2.23).[]

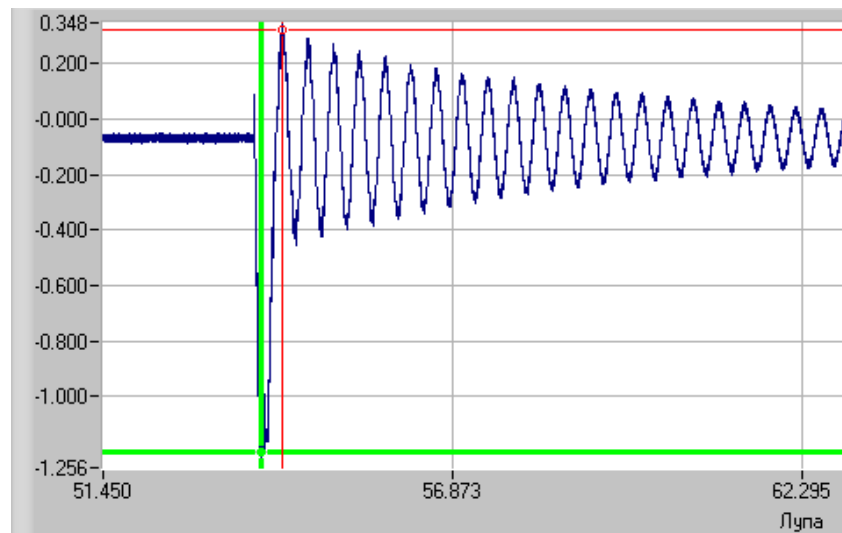


Рисунок 2.22 – Визначення меж максимальної амплітуди перехідного процесу

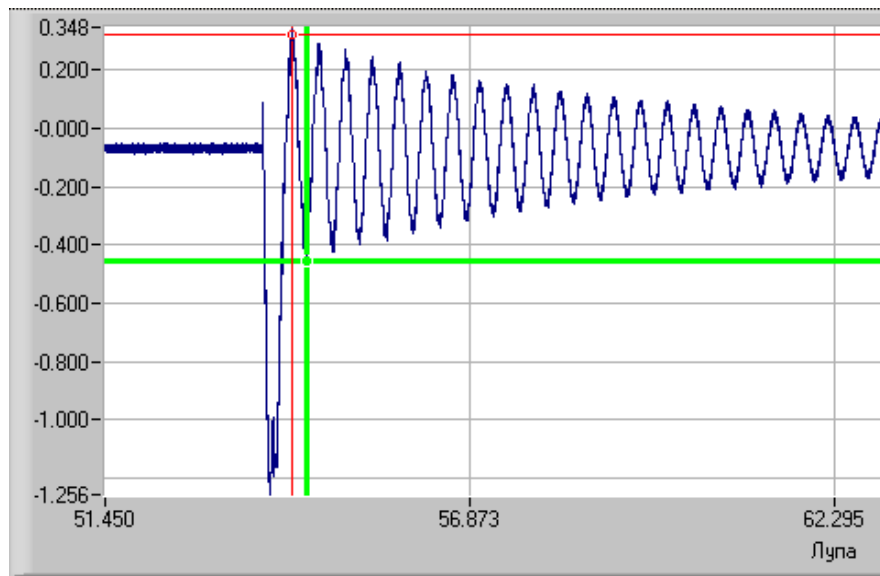


Рисунок 2.23 – Визначення меж середньої амплітуди перехідного процесу

Для визначення частоти перехідного процесу так само збільшуємо частина перехідного процесу, позначаємо межі, відповідні n -му кількості коливань. Визначаємо час, за яке вони були здійснені. Для цього відповідний обсяг розподілів dx множимо на ціну поділки. Потім n -ну кількість коливань ділимо на час (рис 2.24).

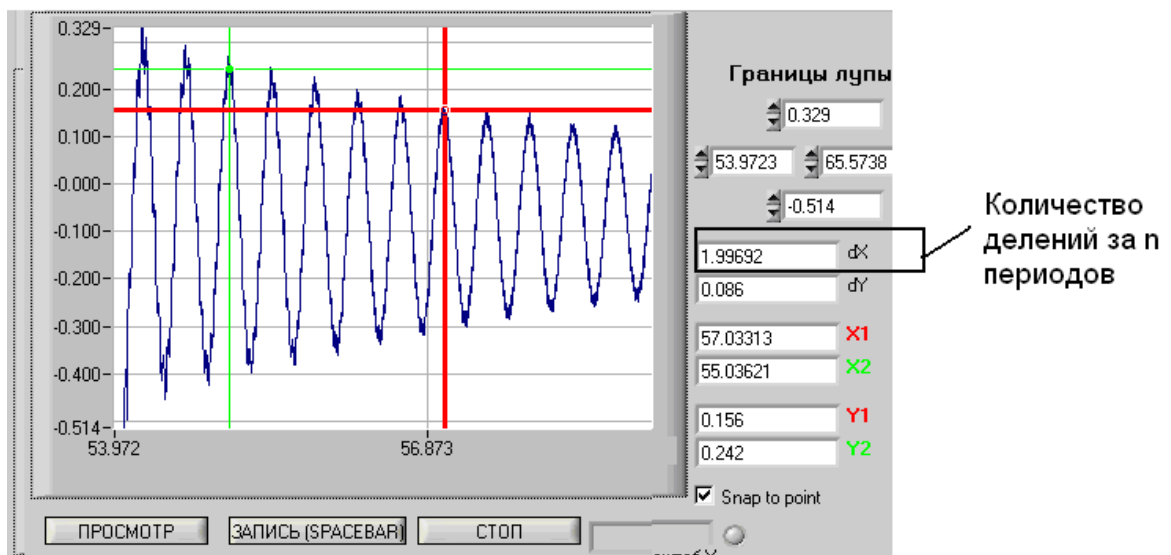


Рисунок 2.24 – Визначення частоти перехідного процесу

Щоб визначити час загасання перехідного процесу, задаємо межі «лупи» по осі X , в яких динамічна похибка лежить в межах 0,5%. Межі

динамічної похибки дорівнюють межах початкової амплітуди перехідного процесу збільшеним в 1,01 рази. Час загасання перехідного процесу дорівнює часу від початкового сплеску до того моменту, коли амплітуда перехідного процесу не виходить за межі амплітуди динамічної похибки.[18]

Аналіз власних частот коливань тензорезисторних датчиків

Аналіз власних частот коливань тензорезисторних датчиків зсувного типу в ненавантаженому стані показав (додаток Г), що найбільша частота у датчика фірми HBM RSCBC3 зсувного типу на 1 тонну становить 2780 Гц, далі йде датчика PBTS зсувного типу на 1 тонну - 2600 Гц, у датчика фірми ESIT зсувного типу на 20 тон власна частота коливань найменша - 723 Гц.

При дослідженні впливу використання елементів демпфірування на власні частоти коливань датчика фірми HBM RSCBC3 зсувного типу в ненавантаженому і навантаженому станах, отримали наступні результати (додаток Г).

На власну частоту коливань датчика фірми HBM RSCBC3 зсувного типу використання елементів демпфірування впливає незначною мірою.

Власна частота коливань ненавантаженого датчика RSCBC3 зсувного типу:

- без демпфірування - 2780 Гц;
- елемент демпфірування - гума №1 - 2730 Гц.

Власна частота коливань навантаженого датчика (при 20 кг навантаження) RSCBC3 зсувного типу:

- без демпфірування - 450 Гц;
- елемент демпфірування - гума №1 - 470 Гц.

При дослідженні впливу додаткової маси (навантажений датчик) на власні частоти коливань датчика фірми HBM RSCBC3 зсувного типу, отримали наступні результати (додаток Г).

На власну частоту коливань датчика фірми HBM RSCBC3 зсувного типу використання додаткової навантажувальної маси впливає значною мірою.

Власна частота коливань датчика RSCBC3 зсувного типу:

при навантаженні 20 кг - 450 Гц;

при навантаженні 40 кг - 290 Гц;

при навантаженні 60 кг - 260 Гц.

При дослідженні впливу висоти удару на власні частоти коливань і амплітуду перехідного процесу датчика PBTS зсувного типу, отримали наступні результати (додаток Г).

На власну частоту коливань і амплітуду перехідного процесу датчика PBTS зсувного типу висота удару не впливає.

2.1.3 Обґрунтування адекватності математичного моделювання

Для перевірки адекватності роботи математичної моделі були використані результати проведених експериментів.

У математичної моделі за формулами (1.18) і (1.45) були використані наступні параметри

А. Датчик PBTS:

модуль Юнга $E = 210 \cdot 10^9$ Па;

ширина ЧЕ $b = 10 \cdot 10^{-3}$ м;

товщина ЧЕ $h = 22 \cdot 10^{-3}$ м;

довжина ЧЕ $l = 30 \cdot 10^{-3}$ м;

маса прикріплена $M = 0,65$ кг;

маса ЧЕ $M_6 = 0,08$ кг.

В результаті отримані значення власної частоти датчика:

- ненавантажний датчик – 2690 Гц;
- навантажний 20 кг – 503 Гц;
- навантажний 40 кг – 359 Гц;
- навантажний 60 кг – 294 Гц;

Б. Датчик RSCBC3:

модуль Юнга $E = 180 \cdot 10^9$ Па;

ширина ЧЕ $b = 9 \cdot 10^{-3}$ м;

товщина ЧЕ $h = 18 \cdot 10^{-3}$ м;

довжина ЧЕ $l = 25 \cdot 10^{-3}$ м;

маса прикріплена $M = 0,5$ кг;

маса ЧЕ $M_6 = 0,05$ кг.

В результаті отримані значення власної частоти датчика:

- ненавантажений датчик – 2650 Гц;
- навантажений 20 кг – 432 Гц;
- навантажений 40 кг – 307 Гц;
- навантажений 60 кг – 252 Гц;

В. Датчик фірми ESIT:

модуль Юнга $E = 198 \cdot 10^9$ Па;

ширина ЧЕ $b = 55 \cdot 10^{-3}$ м;

товщина ЧЕ $h = 21 \cdot 10^{-3}$ м;

довжина ЧЕ $l = 90 \cdot 10^{-3}$ м;

маса прикріпленої $M = 2,7$ кг;

маса ЧЕ $M_6 = 1$ кг.

В результаті отримано значення власної частоти датчика:

- ненавантажний датчик – 715 Гц;

При сравнении полученного значения с результатами исследований тензорезисторных датчиков сдвигового типа было установлено следующее:

- абсолютная погрешность математической модели = $2780 - 2690 = 90$ Гц;

- относительная погрешность математической модели = $\frac{90 \cdot 100\%}{2780} = 3,24\%$.

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ

В даному розділі зроблено вибір експериментального обладнання та методів проведення експериментів з чутливими елементами тензорезисторних датчиків.

Розроблено інформаційно-вимірювальна системи реєстрації сигналів тензодатчиків.

Проведено дослідження пружних елементів ваговимірювальних систем. Отримано експериментальні дані, оброблені в програмному забезпеченні MathLab. Перевірено адекватність математичної моделі. Похибка відповідності з власної частоті коливання пружного елемента не перевищує 3,24%.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ПРОТИУДАРНА ВАГОВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА»

3.1 Опис ідеї проекту

Для вибору платформних ваг, які застосовуються у важких експлуатаційних умовах необхідно врахувати велику кількість різних технічних, технологічних та метрологічних характеристик. Так при використанні ваг в металургійному виробництві для зважування компактних, важких і жорстких металевих виробів, виникає небезпека пошкодження ваг вантажем при його установці на ваги внаслідок виникаючих ударів. Для вирішення експлуатаційної надійності необхідно застосовувати ваги спеціальних конструкцій -протиударні ваги.

Таблиця 3.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Підвищення точності вимірювання та запобігання виходу з ладу ваговимірювальних датчиків, захист їх від ударних навантажень.	1.Металургія	Захист від імпульсних навантажень, підвищення надійності
	2.Ваговимірювання	Підвищення точності
	3. Торгівельна мережа	Підвищення точності

Висновок: вибір ідеї стартапу був не легким, важливим було визначитись з областю використання та вигодою для користувачів. Було обрано галузь ваговимірювання, яка займає визначальне місце в металургії та впливає на економічну ситуацію в країні прямо пропорційно. Підвищення точності та надійності ваговимірювальних датчиків, та захист їх від ударних навантажень.

Таблиця 3.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характери- стики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабк а сторо на)	N (нейтр альна сторо на)	S (сильн а сторо на)
		Мій проект	«Укрве ском»	«Мік а»	«Етал он»			
1.	Точність	0,01%	0,1%	0,95%	0,2%		+	
2.	Надійність	надій на	надійна	надій на	надій на			+
3.	Ціна	300 тис.гр н	390 тис.грн	400 тис.гр н	350 тис.гр н			+
4.	Інформаційне забезпече ння	-	+	+	+	+		
5.	Доступ до ресурсів	+	+	+	+		+	

Висновок: визначили перелік слабких та сильних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару. Дана ідея цілком є конкурентоспроможною. Досить великий відсоток сильних сторін відносно конкурентів. Визначили коло конкурентів та їх продукцію, порівняли з ідеєю потенційного товару. Техніко-економічні характеристики відповідають усім нормам для впровадження даного проекту.

3.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 2.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Виготовлення датчику та ваговимірювальної системи в цілому	«Єдиний блок»	наявна	доступна
2.	Виготовлення комплектуючих	Тонкоплівкова	наявна	доступна
3.	Виготовлення датчику	Кремнієва	наявна	доступна
4.	Виготовлення нової системи	Патентування та використання у торгівлі	наявна	доступна
5.	Зменшення кількості датчиків	Проведення експерименту та обробка результатів	наявна	доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Вибрана технологія – тонкоплівкова, досить широко поширюється на підприємствах з виготовлення ваговимірювальних систем.				

Висновок: за результатами аналізу технологічна реалізація проекту допустима, доцільним зробити автоматизацію процесів зборки системи. Так як виготовлення датчика здійснюється на вітчизняному обладнанні, а всі інші деталі транспортуються з іноземних підприємств. Треба час на обслуговування та введення в роботу системи в цілому. Перевірка її на правильність та доцільність результатів.

3.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 3.3. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	3 фірми
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	250 тис.грн
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу	Легко увійти на ринок
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Патентування датчиків
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	35%

Висновок: ринок є привабливим для входження проекту. Кількість головних гравців сягає 3 одиниць. Загальний обсяг продаж 250 тис. грн за одну одиницю. Динаміка ринку зростає, наявність серйозних обмежень для входу немає. Специфічними умовами до стандартизації може стати патентування датчиків, а на це уходить багато часу. Середня норма рентабельності сягає 35%.

Таблиця 3.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	точність вимірювань	Азовсталь	Підвищення точності до 0,01 %	При широкому діапазоні вимірювань
2.	надійність конструкції	Азовсталь	Не виходить з ладу при імпульсній взаємодії	Малі габарити та не більше 4 датчиків у системі

3.	довговічність	Азовмаш	Захист датчиків додатковим матеріалом	Не дорогий матеріал, який захищає від ударів
4.	ціна	Запоріжсталь	Зменшення вартості за рахунок виготовлення датчиків на вітчизняних фірмах.	Зменшення ціни
5.	обслуговування	Азовмаш	Простота обслуговування, контроль за справною роботою	Додаткове обладнання та простота його використання

Висновок: сформовано список потенційних груп клієнтів, які готові обрати продукцію за рахунок зниження ціни, підвищення надійності, точності вимірювань, сучасне обслуговування, довговічності датчиків та системи в цілому. Ряд вимог споживачів до виробника є прийнятними та мотивують до розроблення більш якісного асортименту.

Таблиця 3.4 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Несвоєчасність	Несвоєчасна поставка комплектуючих для зборки ваговимірювального перетворювача	Відмова від замовлення
2.	Ціна	Зміна курсу валюти при закупівлі зарубіжних комплектуючих	Не оплачена різниця. Так як час перебільшив очікування

3.	Інвестиції	Несвоєчасна сплата покупців призведе до зменшення темпу виконаної роботи	В подальшому перехід закупівель у конкурентів
4.	Людський фактор	Людський фактор, наскільки швидко проходить формальну перевірку на видачу товару	Відмова від подальших товарних відносин
5.	Законодавчі перепони	Патентування нових датчиків	Зупинка виробництва, відмова від співпраці

Висновок: аналіз факторів загроз показав, що треба виконувати вчасно домовлену роботу. Перевіряти та транспортувати у відведені строки. Якщо матиме місце одна із загроз, то компанія-замовник може перестати співпрацювати та перейти на сторону конкурентів. Що є мотивацією для прискорення темпу виробництва.

Таблиця 3.5 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Молоде покоління працевлаштованих	Молоді фахівці швидше реагують та проробляють механізм у виробництві	Подальша співпраця та інвестування у подальший розвиток проекту
2.	Виготовлення датчиків на вітчизняних підприємствах	Виготовлення з відчизняної сировини датчиків, що зумовлює зниженню цін на весь ваговимірювальний перетворювач	Підкріплення кращими приладами та збільшення попиту на продукт

3.	Зменшення ціни	Зборка ваговимірювальної системи буде здійснюватись на вітчизняних підприємствах, використання то же ж обладнання	Збільшення кількості замовлень, за незначний період
4.	транспортування	Швидке транспортування на установка на об'єктах замовника	Подальша співпраця та інвестиції
5.	обслуговування	Ведення обліку правильної роботи датчика	Інформаційне забезпечення та реклама

Висновок: при аналізі факторів можливостей є ряд характеристик, які сприяють конкурентоспроможності, введення на ринок продукту без перешкод. Та навпаки при збільшенні бази покупців зростає інформаційне забезпечення та реклама даної продукції. Ймовірність інвестування у розвиток подальшого виготовлення ваговимірювальних систем.

Таблиця 3.6 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - олігополія	Пару компаній конкурентів	Висока якість сервісу
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжрегіональна	Представники в різних країнах	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Працює в одній галузі	Пропонувати більш точні результати

4. Конкуренція за видами товарів - товарно-видова	Товар одного виду	Реклама
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Вартість залежить від комплектуючих	Ціна-якість вибір
6. За інтенсивністю - марочна	Відомі виробники володіють більшими ресурсами та базою клієнтів	Отримання держзамовлення

Висновок: типом конкуренції є олігополія, що дозволяє конкурувати з парою компаній за високою якістю сервісу. За рівнем конкурентної боротьби міжрегіональна, є представники у різних країнах, в перспективах вихід на міжнародний ринок. За галузевою ознакою – товар одного виду(внутрішньогалузева). За характером конкурентних переваг не цінова, бо залежить від комплектуючих.

Таблиця 3.7 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Американська компанія, УкрВеском	Азовмаш, Запоріжсталь, Укрвеском	Азовмаш, Запоріжсталь, Укрвеском	Торгівельні точки, держава	Ваги з датчиком зтиску-розтягу
Висновки:	Інтенсивність конкурентної боротьби середня	Можливий вихід на ринок Потенційні конкуренти є. Строки виходу їх на ринок – 3 місяці	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Клієнти вимагають високої точності продукції та низької цінової політики	Мала кількість фірм працює в цій галузі

Висновок: за результатами аналізу таблиці принципової можливості роботи на ринку з огляду на конкурентну ситуацію є швидке впровадження

продукту, розкрутка в інформаційних системах, підвищення метрологічних, експлуатаційних характеристик. Вихід на ринок проект зможе завдяки швидкому виробництву та зниженій ціні.

Таблиця 3.8 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Фінансове положення	Зниження ціни за рахунок заміни вітчизняними датчиками
2.	Науково-дослідна база	Патентовані датчики та присутні товарні марки
3.	Забезпеченість кадрами	Високодосвідченні фахівці
4.	Наявність сбутової мережі	Широка база даних для збуту
5.	Можливість кредитування	Збільшення виробництва за рахунок інвесторів

Висновки: фінансове положення забезпечує зниженню цін за рахунок заміни датчиків на вітчизняні. Патентовані прилади та затверджені товарні марки у продукції. Можливість знаходження інвесторів для подальшого виробництва та збільшення клієнтської бази. Широка база даних для збуду товару та його реалізації.

Таблиця 9. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з стартап-проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Фінансове положення	15				+			
2	Науково-дослідна база	19		+					
3	Забезпеченість кадрами	13						+	
4	Наявність сбутової мережі	12				+			
5	Можливість кредитування	10		+					

Висновки: простота експлуатації є великою перевагою, так як не треба знаходити спеціально навченого персоналу. Зменшення ціни за рахунок виготовлення датчиків на вітчизняних підприємствах. Сервіс та програмне обслуговування цілком ліцензійне. Транспортування вчасне, установка та калібрування системи .

Таблиця 3.10 SWOT- аналіз стартап-проекту

<u>Сильні сторони:</u> 1. Нижча собівартість 2. Більша точність 3. Менші габарити 4. Висока ймовірність виходу на ринок за рахунок сильних сторін, так як вони є рішучими для клієнтів. 5. Транспортування та монтування.	<u>Слабкі сторони:</u> 1. Реклама, 2. Мала база даних покупців, 3. Недостатньо коштів на реалізацію, тривалий час очікування. 4. Доступ до рекламного забезпечення не складний, але за конкуренцією дуже важно вийти на ринок завдяки ньому. 5. Тривалий час очікування відбувається за малих інвестицій
<u>Можливості:</u> 1.молоде покоління працевлаштованих 2.виготовлення датчиків на вітчизняних підприємствах 3.зменшення ціни 4.транспортування 5.обслуговування	<u>Загрози:</u> 1.Несвоєчасність 2.Ціна 3.Інвестиції 4.Людський фактор 5.Законодавчі перепони

Висновок: при порівнянні сильних та слабких сторін маємо великі шанси на швидке входження на ринок продукту. З сильних сторін маємо нижчу собівартість, більшу точність та менші габаритні розміри. Великий шанс отримати держзамовлення і завдяки цьому ввійти на міжнародний ринок. Слабкі сторони стосуються рекламного забезпечення та мала база покупців.

Таблиця 3.11 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Отримання держзамовлення	10%	4 місяці
2.	Пошук інвестицій	90%	1,5 місяці
3.	Суперництво	50%	6 місяців

Висновок: серед двох альтернативних способів впровадження проекту розглянуто держзамовлення та пошук інвесторів. Строки реалізації при держзамовленні сягатимуть 4 місяців, і ймовірність отримання ресурсів 10%, що є дуже малою. При знайденні інвесторів проект буде виконан за 1,5 місяці і в свою чергу отримає 90% ресурсів.

3.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 3.12 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачі в сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Постачання на підприємства	готовий	Замовлення 2 рази на місяць	Середньо-інтенсивна конкуренція	Середньої важкості
2.	Держустанови	готовий	Замовлення раз у рік	Слабо-інтенсивна конкуренція	Легке входження
3.	За межами держави	готовий	Кожний квартал	Велико-інтенсивна конкуренція	Високої важкості
4.	Одиничне постачання	готовий	Раз у рік	Слабо-інтенсивна конкуренція	Легке входження

5.	Торгівля	готовий	Раз у пів року	Низька	Середньої важкості
Які цільові групи обрано: Обрано держустанови та постачання на підприємства.					

Висновок: цільові групи дуже різнопланові, починаючи від держзамовлень, закінчуючи замовленнями за межі держави. Готовність споживачів прийняти продукт позитивна. Попит в межах цільових груп в середньому 2 рази на рік. Інтенсивність конкуренції є середньою, що сприяє підвищенню праце-мотивації по виробництву нового продукту. Простота входження у сегмент середня.

Таблиця 3.13 Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Пошук інвесторів та держзамовлення	Диференційований маркетинг	Виготовлення датчика на вітчизняних підприємствах	На початку наслідування конкурентів, при подальшому введенні оригінальної стратегії, що зумовить вихід на ринок у найпередових позиціях

Висновок: обрана альтернатива розвитку спрямована на пошуку інвесторів та отримання держзамовлення. Обрана стратегія охоплення ринку – диференційований маркетинг, що охоплює два спрямування. Ключовими позиціями є те, що виготовлення датчику проходить на вітчизняних підприємствах. Стратегією є наслідування за

компаніями конкурентами, що в подальшому переходить в оригінальну стратегію і тягне за собою стрімке входження на ринок.

Таблиця 3.14 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Ні, але складові системи та метод обчислення використовується вперше	Буде шукати нових та наповнювати базу існуючими	Так, кількість датчиків в системі та їх розташування	Підкріплення підвищенням рекламного аспекту та знаходження кращих фахівців

Висновок: даному проекту є аналоги, але використовується інші датчики, додатковий захист та новий метод обчислення. Головною задачею є пошук нових споживачів та наповнення існуючої бази. Копіювання основного конструкторського рішення та кількості використаних датчиків і їх розташування. Стратегія конкурентної поведінки закладається у підвищенні рекламного аспекту та набору кращих фахівців.

Таблиця 3.15 Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Доступність	Диференційована	Самодіагностика, самокалібровка	Ціна-якість, зручний інтерфейс
2.	Точність вимірів	Диференційована	Повірка	Точність

3.	Транспорт ування	Диференційована	Монтаж	Легке обслуговування та ремонт обладнання
----	------------------	-----------------	--------	---

Висновок: аналіз ринкової стратегії проекту показав, що входження на ринок не є легким, тому треба приділити увагу рекламному аспекту, розширенню бази покупців. Всі технічні, метрологічні та експлуатаційні характеристики задовольняють потребу споживача та готові виходити на ринок і мати конкурентоспроможну позицію.

3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 3.16 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Підвищення точності	Досягання 0,01% точності	В конструкції вмонтовано датчик, який не використовується у конкурентів
2.	Захист від імпульсних навантажень	Захист датчика знизу та верзу допоміжним матеріалом	У конкурентів захист використовується тільки зверху, як додаткова площа, яка не захищає від удару
3.	ціна	Зменшення ціни за рахунок датчика	Так як датчик виготовляється на вітчизняному обладнанні, ціна всього ваговимірювального перетворювача буде знижена

Висновок: маємо 3 основні потреби споживача до виробу: підвищення точності, захист від імпульсних навантажень та зменшення ціни. Всі пункти задовольняють та в повній мірі вигідні для покупця. Точність досягнута до 0,01%, захист здійснюється за допомогою введення допоміжних матеріалів знизу та зверху датчика, що гарантує безпечний демпфер і усуває поломку датчика.

Таблиця 3.17 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Виготовлення ваговимірювальної протиударної системи. Має підвищену точність 0,01%, надійність, захист від ударних навантажень та працездатність у важких умовах експлуатації.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристик и	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1.Технологічність	+	Тх
	2. Удароміцність	+	Тх
	3.Довговічність	5років	Тх
	4.Ціна	300.000	Е
	5.Швидкодія	2,5 сек	Тх
	Якість: стандартизовані деталі, запатентовані датчики		
	Пакування – фірмова упаковка		
Марка: Natali-vesPro + «ВС-тензодатчик удароміцний»			
III. Товар із підкріплення м	До продажу – повна комплектація		
	Після продажу – гарантія, доставка, упаковка		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентуванням та товарною маркою, захист інтелектуальної власності			

Висновок: сутність даного проекту є виготовлення ваговимірною протиударної системи, що має підвищені показники точності, надійності та захист від ударних навантажень. До властивостей відносимо технологічність, удароміцність та довговічність. Якість продукції гарантовано стандартизованими деталями та патентованими датчиками. Захищення даного товару відбувається захистом інтелектуальної власності.

Таблиця 3.18 Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	300-400тис. грн	300-350тис. грн	500 тис. грн	200-450 тис.грн

Висновок: ціна має суттєві відриви, бо комплектація відбувається з різних іноземних фабрик, датчики мають різні технічні характеристики, що зумовлює різницю в цінових межах. Так як по даному проекту тензометричний датчик виготовляється на вітчизняному обладнанні, ціна має знижене значення відносно товарів-аналогів.

Таблиця 3.19 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Оренда	Доставка та монтаж	0	роздрібна
2.	Продаж	Доставка, сервіс	0	прямий

Висновок: продаж товару всюди, де продається продукція конкурентів, і всюди, де її немає. Відповідність системи збуту цілям маркетингу. Наближення місць продажу до споживачів. До функцій збуту віднесемо доставку та монтаж. Оптимальною системою збуту є роздрібна. Специфіка закупівельної поведінки – канал нульового рівня.

Таблиця 3.20 Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Обирання більш якісного товару, з більшою точністю, надійністю, уникнення виходу зі строю при ударних навантаженнях.	Реклама, соцмережі	Контент-маркетинг	Зацікавлення, відмова від покупки у конкурентів	Якість Надійність Довговічність точність

Висновок: при виборі на ринку більш якісного обладнання, покупець зіштовхується з тяжким вибором. Головними чинниками є підвищення точності зважування, захист від ударних навантажень та простота обслуговування. Цінова політика теж має місце, тому не завжди іноземні комплектуючі займають провідне місце для вибору всієї системи.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ

Даний розділ присвячений розробленню першого етапу створення стартап-проекту. Найголовнішим в проведенні будь-якої наукової роботи є подальша комерціалізація отриманих результатів та можливість застосування розробленої концепції в промисловості. Більшість ідей в тій чи іншій мірі впливають на економічну складову підприємства. Тому розроблена ідея може бути використана як бізнес модель та може бути продана зацікавленим особам.

Виходячи з аналізу маркетингових аспектів даний проект має місце для реалізації, сприяє підвищенню динаміки ринку ваговимірювального виробництва, повною мірою є конкурентно-спроможним.

Має великі перспективи на впровадження з огляду на потенційних клієнтів. Бар'єрами входження на ринок може стати інформаційне забезпечення. Повністю конкурентоспроможний проект, так як зборка ваговимірювальної системи та виготовлення тензорезисторного датчика відбувається на вітчизняному обладнанні, транспортування на обслуговування доступне.

Зважаючи на отримані результати в процесі розробки стартап-проекту можна сказати, що на ринку наявний попит для збуту продукції, з великим динамічним ростом в останні роки, що може відіграти вирішальну роль в швидкій рентабельності проекту.

З огляду на потенційні групи клієнтів видно, що є перспективи впровадження стартап-проекту в життя, особливо з точними характеристиками, високою стабільністю та з широким профілем використання, що додатково дозволить привертати увагу потенційних інвесторів.

ВИСНОВОК

В результаті написання дипломної роботи проаналізовано основні елементи ваговимірювального перетворювача на основі тензорезисторних датчиків.

Розроблено універсальну математичну модель ваговимірювального перетворювача. Проведено експериментальні дослідження з визначення власних частот тензорезисторних перетворювачів під дією різних факторів.

Розроблено алгоритм результатів проведених експериментів за допомогою програмних пакетів L-Graph та MathLab. Проведено обробку результатів досліджень. Отримані наступні дані: власна частота коливання ненавантаженого УЧЕ:

HBM RSCBC3 - 2780 Гц;

ПВТС - 2600 Гц;

ESIT - 723 Гц;

Доведено адекватність математичної моделі пружного елемента отриманим експериментальним даним. Похибка відповідності з власної частоті коливання пружного елемента не перевищує 3,24%. Результати роботи можуть застосовуватися в проектуванні систем вимірювання ваги для зважування металевих виробів на швидкостях до 0,4 км / год.

В розділі стартап-проекту було проведено аналіз конкурентно-спроможності ваговимірювальної системи на ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Браславський Д.А., Логунов С.С., Пельпор Д.С. Авіаційні прилади й автомати. М.: «Машинобудування», 1978.
2. Вигода Ю.А., Осадчий Е.П., Тихонов О.І. Проектування вимірювальних елементів (датчиків) систем автоматики. Навчальний посібник. Пенза, Пензскій політехнічний інститут, 1977.
3. ТУУ-1 924 8582 - 001: 2006.
4. Хоффман К. Введення в техніку вимірювання на основі тензорезисторних датчиків. Перекладач Марчук Л.П. К.: ЦООНТИ ЗНО, 1987.
5. Вигода Ю.А. Дослідження роботи тензорезистивного датчика тиску при впливі динамічних навантажень. Вчені записки Пензського політехнічного інституту «Математика і механіка», вип. 5, Пенза, 1974.
6. Годзіковській В.А. Розрахунок основних конструктивних параметрів і завадостійкості при проектуванні тензорезисторних датчиків сили. - В кн.: Сучасні проблеми розвитку випробувальних машин, весодозірочної і силовимірювальної техніки / Под ред. Ю.М. Сергієнко. М.: НІКІМП, 1978, с. 81-96.
7. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уївер У. Коливання в інженерній справі. М., «Машинобудування», 1985.
8. Бабаков І.М. Теорія коливань. М., «Наука», 1968.
9. Початок роботи з MATLAB. Перекл. з англ. Конюшенко В.В. - 2004.
10. L -Graph2. Інструкція користувача. М.: 2007.
11. Корн Г., Корн Т. Довідник з математики для науковців та інженерів. - М.: Наука, 1978.
12. Анурьев В.І. Довідкова конструктора машинобудівника. М.: «Машинобудування». 2001 р

13. Зеленцов Ю.А. Нові принципи побудови схеми вимірювального моста. Міст Зеленцова - Мокрова. №7.2001.
14. Міхєєв М. Ю., Сьомочкіна І. Ю., Чувикін Б. В. багатомасштабного вимірювальний перетворювач для тензометричних систем. №8.
15. L-Graph. Програма багатоканального осцилографа - спектроаналізатора - реєстратора під Windows. Інструкція користувача. ЗАТ Л-кард, 2002.
16. Вигода Ю.А. Динамічний режим однієї конструкції тензорезистивного датчика тиску. Деп. ВІНІТІ, №1232-75. Реф. В РЖ «Механіка», 1975, №8, реф. 8В300.
17. Вигода Ю.А. Дія вібрації на тензорезистивного датчик тиску з пружним елементом у вигляді балок постійного перерізу. Деп. ВІНІТІ, № 1904-75. реф. В РЖ «Механіка», 1975, №11, реф.11В1218.
18. Бабаков І.М., До визначення максимальної частоти малих коливань, Наукові записки ХММІ, т. 5, 1960.
19. Грановський В.А., також сирота Т.Н. Методи обробки експериментальних даних при вимірах, Л., «Вища школа», 1990..
20. Долинський Е.Ф. Обробка результатів вимірювань. - М .: Изд-во стандартів, 1989.
21. Стрільців С.П. Введення в теорію коливань, «Машгиз», 1968.
22. Інформація та документація. Метрологічні аспекти неавтоматичних зважувальних приладів: ДСТУ EN 45501:2016 (EN 45501:2015, IDT). – (Національний стандарт України)
23. Документація. Ваги неавтоматичної дії. Частина 1: ДСТУ OIML R 76-1:2014. – (Національний стандарт України)

24. Документація. Датчики навантаження (ваговимірювальні): ДСТУ OIML R 60:2010. Метрологічні норми та методи випробування (OIML R 60:2000, IDT). – (Національний стандарт України)

25. Промислові ваги для металургії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.metra.ru/solutions/metallurgical-industry.html>

ДОДАТКИ

Додаток А

Програма для розрахунку АЧХ,ФЧХ та перехідних характеристик зсувного перетворювача

Додаток А.1 та А.2

Програми А.1 і А.2 призначені для розрахунку амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик ненавантаженого і навантаженого перетворювача відповідно. Список ідентифікаторів представлений в табл.А.1.

Блок 1 призначений для введення наступних даних: ω_0 - власна частота коливань пружної системи, коефіцієнт загасання χ . Блоком 2 здійснюється розрахунок амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик $A(\omega)$ і $F(\omega)$ відповідно.

У блоці 3 здійснює виведення значень $A(\omega)$, $F(\omega)$.

Дана програма істотно полегшує і прискорює процес обчислення необхідних параметрів.

Таблиця А.1 – Список ідентифікаторів у програмі А.1 по розрахунку амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик $A(\omega)$ и $F(\omega)$ відповідно для ненавантаженого перетворювача

Позначення		Найменування величини	Значення	Одиниці вимірювання
у формулі	у програмі			
		<u>Вхідні дані</u>		
ω_0	ω_0	Власна частота коливань	4.945	10^3 рад/с
ξ	χ	Коефіцієнт загасання	0.1	
$A(\omega)$	$A(\omega)$	Амплітудно-частотна характеристика		
$F(\omega)$	$F(\omega)$	Фазо-частотна характеристика		

Програма А.1

```
#include "stdafx.h"
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

const float wo = 4.945;
const float x = 0.1;

double A[100],F[100];
double w, AA, FF;
int i;

int main() {
    w = 0;
    for (i=0;i<=9;i++) {
        A[i] = 1/sqrt((1-(w/wo)+4*(x*w/wo)*(x*w/wo))*(1-(w/wo)+4*(x*w/wo)*(x*w/wo)));
        F[i] = -(atan(2*x*w*wo/(wo*wo-w*w)))*57.3;
        printf("w=%1.1f  A(w)=%7.5f  F(w)=%5.3f\n", w, A[i], F[i]);
        w = w + 0.5;
    }

    for (i=10;i<=100;i++) {
        A[i] = 1/sqrt((1-(w/wo)+4*(x*w/wo)*(x*w/wo))*(1-(w/wo)+4*(x*w/wo)*(x*w/wo)));
        F[i] = -(atan(2*x*w*wo/(wo*wo-w*w)))*57.3-180;
        printf("w=%1.1f  A(w)=%7.5f  F(w)=%5.3f\n", w, A[i], F[i]);
        w = w + 0.5;
    }

    return 0;
}
```

Результати виконання програми А.1

w=0.0	A(w)=1.000000	F(w)=0.0000
w=0.5	A(w)=1.11198	F(w)=-1.171
w=1.0	A(w)=1.25092	F(w)=-2.415
w=1.5	A(w)=1.42787	F(w)=-3.823
w=2.0	A(w)=1.66087	F(w)=-5.524
w=2.5	A(w)=1.98152	F(w)=-7.736
w=3.0	A(w)=2.45069	F(w)=-10.869
w=3.5	A(w)=3.20253	F(w)=-15.838
w=4.0	A(w)=4.60247	F(w)=-25.081
w=4.5	A(w)=8.12251	F(w)=-46.642
w=5.0	A(w)=33.58813	F(w)=-96.306
w=5.5	A(w)=15.93577	F(w)=-136.819
w=6.0	A(w)=6.47424	F(w)=-152.799
w=6.5	A(w)=4.07586	F(w)=-160.138
w=7.0	A(w)=2.98136	F(w)=-164.249
w=7.5	A(w)=2.35477	F(w)=-166.868
w=8.0	A(w)=1.94892	F(w)=-168.686
w=8.5	A(w)=1.66466	F(w)=-170.024
w=9.0	A(w)=1.45450	F(w)=-171.054
w=9.5	A(w)=1.29282	F(w)=-171.873
w=10.0	A(w)=1.16460	F(w)=-172.541
w=10.5	A(w)=1.06043	F(w)=-173.098
w=11.0	A(w)=0.97415	F(w)=-173.571
w=11.5	A(w)=0.90151	F(w)=-173.977
w=12.0	A(w)=0.83953	F(w)=-174.330
w=12.5	A(w)=0.78603	F(w)=-174.641
w=13.0	A(w)=0.73939	F(w)=-174.917
w=13.5	A(w)=0.69837	F(w)=-175.163
w=14.0	A(w)=0.66202	F(w)=-175.385
w=14.5	A(w)=0.62959	F(w)=-175.586
w=15.0	A(w)=0.60049	F(w)=-175.769
w=15.5	A(w)=0.57422	F(w)=-175.936
w=16.0	A(w)=0.55041	F(w)=-176.090
w=16.5	A(w)=0.52872	F(w)=-176.232
w=17.0	A(w)=0.50889	F(w)=-176.363
w=17.5	A(w)=0.49068	F(w)=-176.485
w=18.0	A(w)=0.47392	F(w)=-176.599
w=18.5	A(w)=0.45844	F(w)=-176.705
w=19.0	A(w)=0.44410	F(w)=-176.804
w=19.5	A(w)=0.43078	F(w)=-176.897
w=20.0	A(w)=0.41838	F(w)=-176.985
w=20.5	A(w)=0.40681	F(w)=-177.067
w=21.0	A(w)=0.39599	F(w)=-177.145
w=21.5	A(w)=0.38585	F(w)=-177.219
w=22.0	A(w)=0.37633	F(w)=-177.289
w=22.5	A(w)=0.36739	F(w)=-177.355
w=23.0	A(w)=0.35896	F(w)=-177.418
w=23.5	A(w)=0.35101	F(w)=-177.478
w=24.0	A(w)=0.34350	F(w)=-177.536
w=24.5	A(w)=0.33640	F(w)=-177.590
w=25.0	A(w)=0.32968	F(w)=-177.642
w=25.5	A(w)=0.32331	F(w)=-177.692
w=26.0	A(w)=0.31725	F(w)=-177.740
w=26.5	A(w)=0.31151	F(w)=-177.785
w=27.0	A(w)=0.30604	F(w)=-177.829
w=27.5	A(w)=0.30083	F(w)=-177.871
w=28.0	A(w)=0.29587	F(w)=-177.912
w=28.5	A(w)=0.29114	F(w)=-177.951
w=29.0	A(w)=0.28663	F(w)=-177.988
w=29.5	A(w)=0.28232	F(w)=-178.024
w=30.0	A(w)=0.27820	F(w)=-178.059
w=30.5	A(w)=0.27426	F(w)=-178.093

w=31.0	A(w)=0.27049	F(w)=-178.125
w=31.5	A(w)=0.26688	F(w)=-178.156
w=32.0	A(w)=0.26343	F(w)=-178.186
w=32.5	A(w)=0.26011	F(w)=-178.216
w=33.0	A(w)=0.25694	F(w)=-178.244
w=33.5	A(w)=0.25389	F(w)=-178.271
w=34.0	A(w)=0.25096	F(w)=-178.298
w=34.5	A(w)=0.24815	F(w)=-178.323
w=35.0	A(w)=0.24546	F(w)=-178.348
w=35.5	A(w)=0.24287	F(w)=-178.373
w=36.0	A(w)=0.24038	F(w)=-178.396
w=36.5	A(w)=0.23799	F(w)=-178.419
w=37.0	A(w)=0.23569	F(w)=-178.441
w=37.5	A(w)=0.23348	F(w)=-178.462
w=38.0	A(w)=0.23135	F(w)=-178.483
w=38.5	A(w)=0.22931	F(w)=-178.504
w=39.0	A(w)=0.22734	F(w)=-178.524
w=39.5	A(w)=0.22545	F(w)=-178.543
w=40.0	A(w)=0.22363	F(w)=-178.562
w=40.5	A(w)=0.22188	F(w)=-178.580
w=41.0	A(w)=0.22019	F(w)=-178.598
w=41.5	A(w)=0.21858	F(w)=-178.615
w=42.0	A(w)=0.21702	F(w)=-178.632
w=42.5	A(w)=0.21552	F(w)=-178.649
w=43.0	A(w)=0.21408	F(w)=-178.665
w=43.5	A(w)=0.21270	F(w)=-178.680
w=44.0	A(w)=0.21137	F(w)=-178.696
w=44.5	A(w)=0.21010	F(w)=-178.711
w=45.0	A(w)=0.20887	F(w)=-178.725
w=45.5	A(w)=0.20770	F(w)=-178.740
w=46.0	A(w)=0.20657	F(w)=-178.754
w=46.5	A(w)=0.20549	F(w)=-178.768
w=47.0	A(w)=0.20445	F(w)=-178.781
w=47.5	A(w)=0.20346	F(w)=-178.794
w=48.0	A(w)=0.20251	F(w)=-178.807
w=48.5	A(w)=0.20161	F(w)=-178.819
w=49.0	A(w)=0.20074	F(w)=-178.832
w=49.5	A(w)=0.19992	F(w)=-178.844
w=50.0	A(w)=0.19913	F(w)=-178.856

Press any key to continue

Таблиця А.2 – Список ідентифікаторів до програми А.2 по розрахунку амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик $A(\omega)$ и $F(\omega)$ відповідно для навантаженого перетворювача

Позначення		Найменування величини	Значення	Одиниці вимірювань
у формулі	у програмі			
		<u>Вхідні дані</u>		
ω_0	ω_0	Власна частота коливань	0.101	10^3 рад/с
ξ	χ	Коефіцієнт загасання	0.1	
$A(\omega)$	$A(\omega)$	Амплітудно-частотна характеристика		
$F(\omega)$	$F(\omega)$	Фазо-частотна характеристика		

Программа A.2

```
#include "stdafx.h"
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

const float wo = 0.101;
const float x = 0.1;

double A[100], F[100];
double w, AA, FF;
int i;

int main() {
    w = 0;
    for (i=0; i<=20; i++) {
        A[i] = 1/sqrt((1-(w/wo)+4*(x*w/wo)*(x*w/wo))*(1-(w/wo)+4*(x*w/wo)*(x*w/wo)));
        F[i] = -(atan(2*x*w*wo/(wo*wo-w*w)))*57.3;
        printf("w=%1.1f  A(w)=%7.5f  F(w)=%5.3f\n", w, A[i], F[i]);
        w = w + 0.005;
    }

    for (i=21; i<=100; i++) {
        A[i] = 1/sqrt((1-(w/wo)+4*(x*w/wo)*(x*w/wo))*(1-(w/wo)+4*(x*w/wo)*(x*w/wo)));
        F[i] = -(atan(2*x*w*wo/(wo*wo-w*w)))*57.3-180;
        printf("w=%1.1f  A(w)=%7.5f  F(w)=%5.3f\n", w, A[i], F[i]);
        w = w + 0.005;
    }

    return 0;
}
```

Результаты выполнения программы А.2

w=0.0	A(w)=1.000000	F(w)=0.0000
w=0.0	A(w)=1.05197	F(w)=-0.569
w=0.0	A(w)=1.10941	F(w)=-1.146
w=0.0	A(w)=1.17320	F(w)=-1.740
w=0.0	A(w)=1.24448	F(w)=-2.361
w=0.0	A(w)=1.32463	F(w)=-3.019
w=0.0	A(w)=1.41543	F(w)=-3.728
w=0.0	A(w)=1.51914	F(w)=-4.504
w=0.0	A(w)=1.63871	F(w)=-5.367
w=0.0	A(w)=1.77811	F(w)=-6.345
w=0.0	A(w)=1.94268	F(w)=-7.472
w=0.1	A(w)=2.13992	F(w)=-8.801
w=0.1	A(w)=2.38063	F(w)=-10.405
w=0.1	A(w)=2.68095	F(w)=-12.393
w=0.1	A(w)=3.06613	F(w)=-14.937
w=0.1	A(w)=3.57804	F(w)=-18.320
w=0.1	A(w)=4.29154	F(w)=-23.035
w=0.1	A(w)=5.35485	F(w)=-29.985
w=0.1	A(w)=7.10871	F(w)=-40.873
w=0.1	A(w)=10.54912	F(w)=-58.504
w=0.1	A(w)=20.36126	F(w)=-84.324
w=0.1	A(w)=275.70008	F(w)=-111.22
w=0.1	A(w)=24.00237	F(w)=-130.515
w=0.1	A(w)=11.52656	F(w)=-142.466
w=0.1	A(w)=7.59568	F(w)=-150.001
w=0.1	A(w)=5.67037	F(w)=-155.035
w=0.1	A(w)=4.52774	F(w)=-158.593
w=0.1	A(w)=3.77117	F(w)=-161.228
w=0.1	A(w)=3.23328	F(w)=-163.253
w=0.1	A(w)=2.83125	F(w)=-164.857
w=0.2	A(w)=2.51939	F(w)=-166.159
w=0.2	A(w)=2.27042	F(w)=-167.237
w=0.2	A(w)=2.06707	F(w)=-168.146
w=0.2	A(w)=1.89786	F(w)=-168.922
w=0.2	A(w)=1.75486	F(w)=-169.593
w=0.2	A(w)=1.63242	F(w)=-170.180
w=0.2	A(w)=1.52641	F(w)=-170.697
w=0.2	A(w)=1.43373	F(w)=-171.158
w=0.2	A(w)=1.35202	F(w)=-171.570
w=0.2	A(w)=1.27944	F(w)=-171.942
w=0.2	A(w)=1.21455	F(w)=-172.279
w=0.2	A(w)=1.15618	F(w)=-172.586
w=0.2	A(w)=1.10341	F(w)=-172.867
w=0.2	A(w)=1.05546	F(w)=-173.125
w=0.2	A(w)=1.01170	F(w)=-173.364
w=0.2	A(w)=0.97162	F(w)=-173.585
w=0.2	A(w)=0.93476	F(w)=-173.790
w=0.2	A(w)=0.90075	F(w)=-173.981
w=0.2	A(w)=0.86928	F(w)=-174.160
w=0.2	A(w)=0.84007	F(w)=-174.327
w=0.3	A(w)=0.81289	F(w)=-174.484
w=0.3	A(w)=0.78754	F(w)=-174.632
w=0.3	A(w)=0.76383	F(w)=-174.772
w=0.3	A(w)=0.74162	F(w)=-174.903
w=0.3	A(w)=0.72077	F(w)=-175.028
w=0.3	A(w)=0.70115	F(w)=-175.146
w=0.3	A(w)=0.68266	F(w)=-175.259
w=0.3	A(w)=0.66521	F(w)=-175.366
w=0.3	A(w)=0.64871	F(w)=-175.467
w=0.3	A(w)=0.63309	F(w)=-175.564
w=0.3	A(w)=0.61828	F(w)=-175.657

w=0.3	A(w)=0.60422	F(w)=-175.745
w=0.3	A(w)=0.59085	F(w)=-175.830
w=0.3	A(w)=0.57812	F(w)=-175.911
w=0.3	A(w)=0.56600	F(w)=-175.989
w=0.3	A(w)=0.55443	F(w)=-176.064
w=0.3	A(w)=0.54339	F(w)=-176.136
w=0.3	A(w)=0.53283	F(w)=-176.205
w=0.3	A(w)=0.52273	F(w)=-176.271
w=0.3	A(w)=0.51305	F(w)=-176.336
w=0.4	A(w)=0.50378	F(w)=-176.397
w=0.4	A(w)=0.49488	F(w)=-176.457
w=0.4	A(w)=0.48634	F(w)=-176.514
w=0.4	A(w)=0.47813	F(w)=-176.570
w=0.4	A(w)=0.47024	F(w)=-176.624
w=0.4	A(w)=0.46265	F(w)=-176.676
w=0.4	A(w)=0.45534	F(w)=-176.726
w=0.4	A(w)=0.44830	F(w)=-176.775
w=0.4	A(w)=0.44151	F(w)=-176.822
w=0.4	A(w)=0.43496	F(w)=-176.868
w=0.4	A(w)=0.42863	F(w)=-176.912
w=0.4	A(w)=0.42252	F(w)=-176.955
w=0.4	A(w)=0.41662	F(w)=-176.997
w=0.4	A(w)=0.41092	F(w)=-177.038
w=0.4	A(w)=0.40540	F(w)=-177.078
w=0.4	A(w)=0.40005	F(w)=-177.116
w=0.4	A(w)=0.39488	F(w)=-177.153
w=0.4	A(w)=0.38987	F(w)=-177.190
w=0.4	A(w)=0.38502	F(w)=-177.225
w=0.4	A(w)=0.38031	F(w)=-177.260
w=0.5	A(w)=0.37574	F(w)=-177.293
w=0.5	A(w)=0.37131	F(w)=-177.326
w=0.5	A(w)=0.36701	F(w)=-177.358
w=0.5	A(w)=0.36283	F(w)=-177.389
w=0.5	A(w)=0.35877	F(w)=-177.420
w=0.5	A(w)=0.35483	F(w)=-177.450
w=0.5	A(w)=0.35100	F(w)=-177.479
w=0.5	A(w)=0.34727	F(w)=-177.507
w=0.5	A(w)=0.34364	F(w)=-177.535
w=0.5	A(w)=0.34011	F(w)=-177.562
w=0.5	A(w)=0.33668	F(w)=-177.588

Press any key to continue

Програма А.3

Програма А.3 призначена для розрахунку перехідного процесу перетворювача в ненавантаженому і навантаженому станах при заданій частоті коливань ω_0 , ω в обох станах відповідно на певній ділянці часу t .

Список ідентифікаторів представлений в табл. А.3.

Блок 1 призначений для введення тимчасового дозволу dt , коефіцієнта загасання χ .

Блоком 2 здійснюється розрахунок перехідної характеристики.

У блоці 3 здійснює виведення значень t , $h(t)$

Дана програма істотно полегшує і прискорює процес обчислення необхідних параметрів.

Таблиця А.3 – Список ідентифікаторів до програми А.2 по розрахунку перехідного процесу перетворювача у ненавантаженому та навантаженому стані при заданій частоті коливань ω_0 , ω в обох станах відповідно на визначеному відрізку часу t

Позначення		Найменування величини	Значення	Одиниці вимірювань
у формулі	у програмі			
		<u>Вхідні дані</u>		
ω_0	w_0	Власна частота коливань	4945	рад/с
ω	w_H	Частота коливань з навантаженням	101	рад/с
E	E	Коефіцієнт Пуассона	0.3	м
ξ	x	Коефіцієнт загасання	0.1	
t_0	t_0	Початковий час	0.027	с
dt	dt	Тимчасовий дозвіл	0.00068	с
$h(t)$	$h(t)$	Перехідна характеристика		

Программа A.3

```
#include "stdafx.h"
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

const float wo=4945.48;
const float wn=101;
const float x=0.1;
const float t0 = 0.027;
const float Nt = 250;

float h, t;
int i;

int main() {
    float dt = t0/Nt;
    printf("dt=%1.5f\n", dt);

    t = 0;
    printf("For wo=%1.3f\n", wo);
    for(i=0;i<100;i++) {
        h = 1-exp(-2*3.14*wo*t*x)*(1/sqrt(1-x*x))*cos(2*3.14*wo*t*sqrt(1-
x*x)+atan(x/sqrt(1-x*x)));
        printf("t=%1.4f h(t)=%f\n", t, h);
        t = t+dt;
    }

    t = 0;
    printf("For wn=%1.3f\n", wn);
    for(i=0;i<100;i++) {
        h = 1-exp(-2*3.14*wn*t*x)*(1/sqrt(1-x*x))*cos(2*3.14*wn*t*sqrt(1-
x*x)+atan(x/sqrt(1-x*x)));
        printf("t=%1.4f h(t)=%f\n", t, h);
        t = t + dt;
    }

    return 0;
}
```

Результати виконання програми А.3

```
dt=0.00011
For wo=4945.480
t=0.0000 h<t>=0.000000
t=0.0001 h<t>=1.687389
t=0.0002 h<t>=0.547047
t=0.0003 h<t>=1.283930
t=0.0004 h<t>=0.833303
t=0.0005 h<t>=1.088666
t=0.0006 h<t>=0.960853
t=0.0008 h<t>=1.009580
t=0.0009 h<t>=1.006576
t=0.0010 h<t>=0.985877
t=0.0011 h<t>=1.016448
t=0.0012 h<t>=0.984148
t=0.0013 h<t>=1.013827
t=0.0014 h<t>=0.988709
t=0.0015 h<t>=1.008769
t=0.0016 h<t>=0.993473
t=0.0017 h<t>=1.004673
t=0.0018 h<t>=0.996782
t=0.0019 h<t>=1.002125
t=0.0021 h<t>=0.998665
t=0.0022 h<t>=1.000786 t=0.0065 h<t>=1.000000
t=0.0023 h<t>=0.999579 t=0.0066 h<t>=1.000000
t=0.0024 h<t>=1.000188 t=0.0067 h<t>=1.000000
t=0.0025 h<t>=0.999951 t=0.0068 h<t>=1.000000
t=0.0026 h<t>=0.999972 t=0.0069 h<t>=1.000000
t=0.0027 h<t>=1.000064 t=0.0070 h<t>=1.000000
t=0.0028 h<t>=0.999924 t=0.0071 h<t>=1.000000
t=0.0029 h<t>=1.000073 t=0.0072 h<t>=1.000000
t=0.0030 h<t>=0.999936 t=0.0073 h<t>=1.000000
t=0.0031 h<t>=1.000052 t=0.0075 h<t>=1.000000
t=0.0032 h<t>=0.999959 t=0.0076 h<t>=1.000000
t=0.0033 h<t>=1.000030 t=0.0077 h<t>=1.000000
t=0.0035 h<t>=0.999978 t=0.0078 h<t>=1.000000
t=0.0036 h<t>=1.000015 t=0.0079 h<t>=1.000000
t=0.0037 h<t>=0.999990 t=0.0080 h<t>=1.000000
t=0.0038 h<t>=1.000006 t=0.0081 h<t>=1.000000
t=0.0039 h<t>=0.999996 t=0.0082 h<t>=1.000000
t=0.0040 h<t>=1.000002 t=0.0083 h<t>=1.000000
t=0.0041 h<t>=0.999999 t=0.0084 h<t>=1.000000
t=0.0042 h<t>=1.000000 t=0.0085 h<t>=1.000000
t=0.0043 h<t>=1.000000 t=0.0086 h<t>=1.000000
t=0.0044 h<t>=1.000000 t=0.0087 h<t>=1.000000
t=0.0045 h<t>=1.000000 t=0.0089 h<t>=1.000000
t=0.0046 h<t>=1.000000 t=0.0090 h<t>=1.000000
t=0.0048 h<t>=1.000000 t=0.0091 h<t>=1.000000
t=0.0049 h<t>=1.000000 t=0.0092 h<t>=1.000000
t=0.0050 h<t>=1.000000 t=0.0093 h<t>=1.000000
t=0.0051 h<t>=1.000000 t=0.0094 h<t>=1.000000
t=0.0052 h<t>=1.000000 t=0.0095 h<t>=1.000000
t=0.0053 h<t>=1.000000 t=0.0096 h<t>=1.000000
t=0.0054 h<t>=1.000000 t=0.0097 h<t>=1.000000
t=0.0055 h<t>=1.000000 t=0.0098 h<t>=1.000000
t=0.0056 h<t>=1.000000 t=0.0099 h<t>=1.000000
t=0.0057 h<t>=1.000000 t=0.0100 h<t>=1.000000
t=0.0058 h<t>=1.000000 t=0.0102 h<t>=1.000000
t=0.0059 h<t>=1.000000 t=0.0103 h<t>=1.000000
t=0.0060 h<t>=1.000000 t=0.0104 h<t>=1.000000
t=0.0062 h<t>=1.000000 t=0.0105 h<t>=1.000000
t=0.0063 h<t>=1.000000 t=0.0106 h<t>=1.000000
t=0.0064 h<t>=1.000000 t=0.0107 h<t>=1.000000
```

Додаток В

Графіки та їх спектри, отримані в результаті експериментальних досліджень зсувних датчиків

На рис.В.1 – В.8 показані залежності $U_{\text{вих}}(t)$ та їх спектри $S(f)$ для датчика HBMS

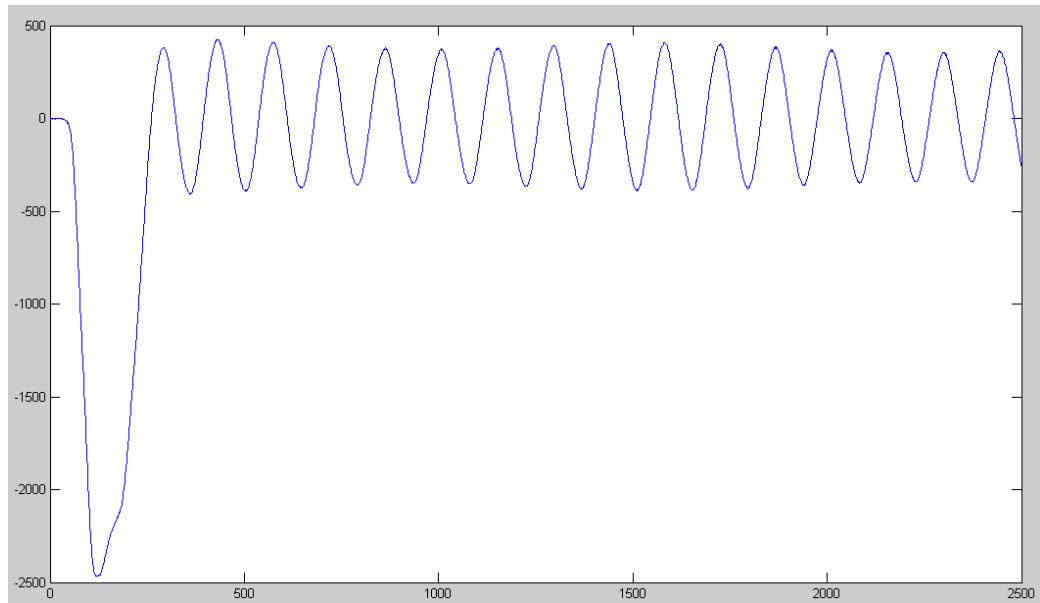


Рисунок В.1 – Удар кулею по ненавантаженому датчику через амортизатор

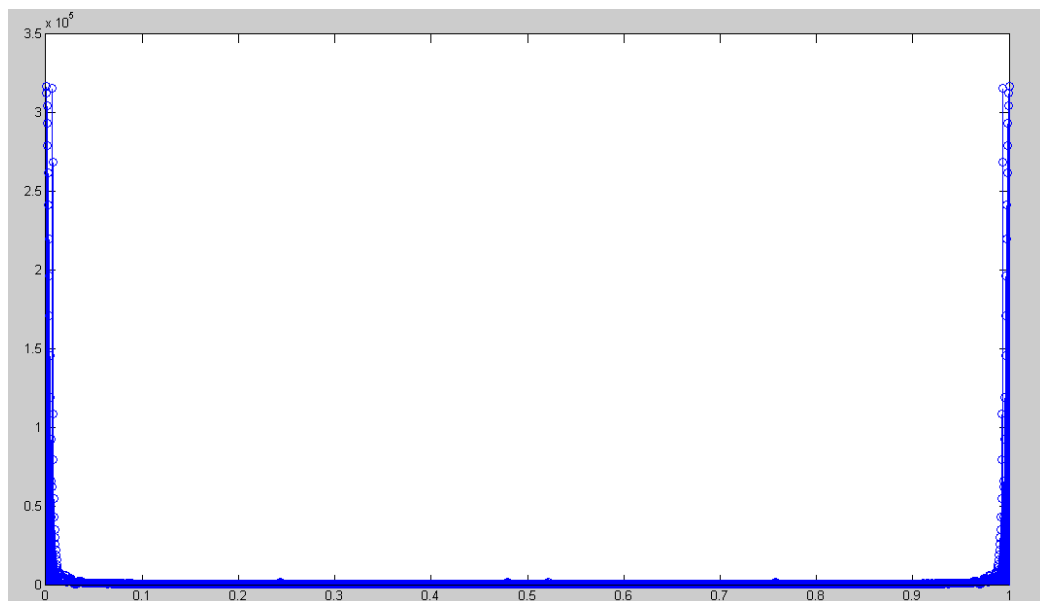


Рисунок В.2 – Спектр від сигналу, представленого на рисунку В.1

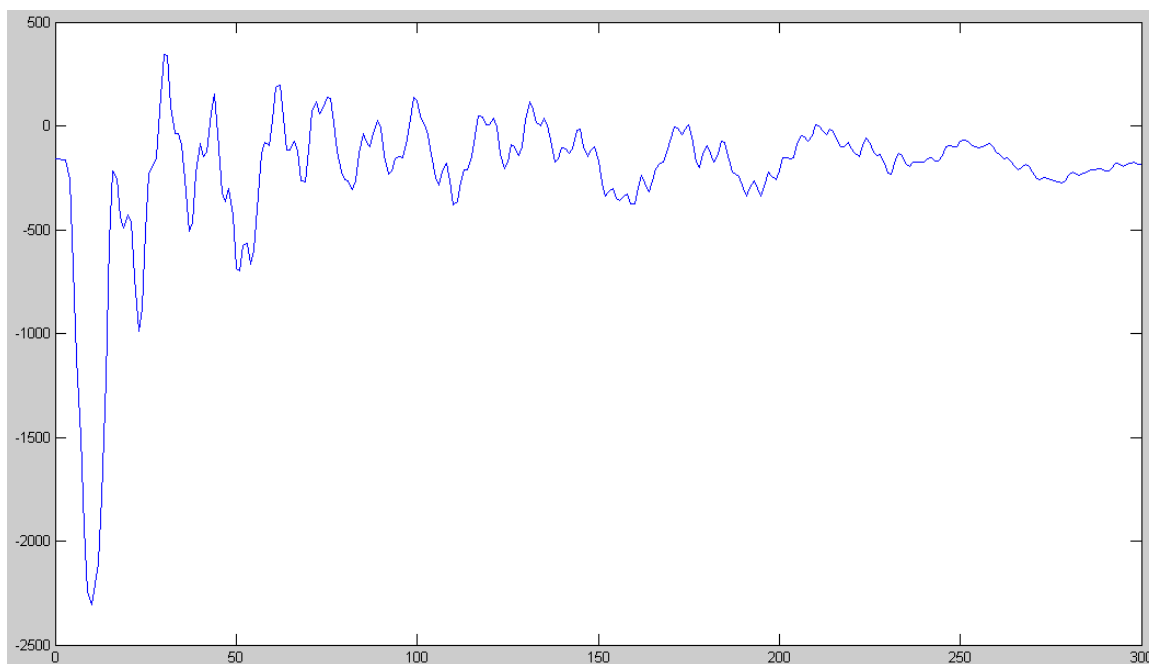


Рисунок В.3 – Удар кулею по навантаженому 20 кг датчику з вкрученим амортизатором

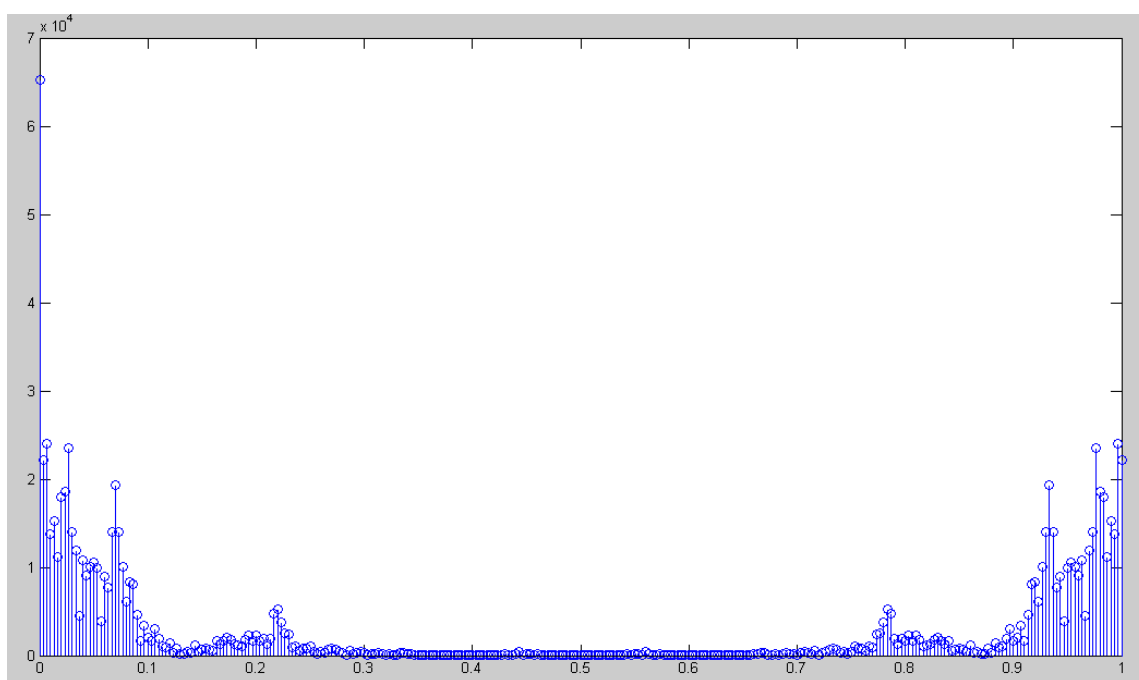


Рисунок В.4 – Спектр від сигналу, представленого на рисунку В.3

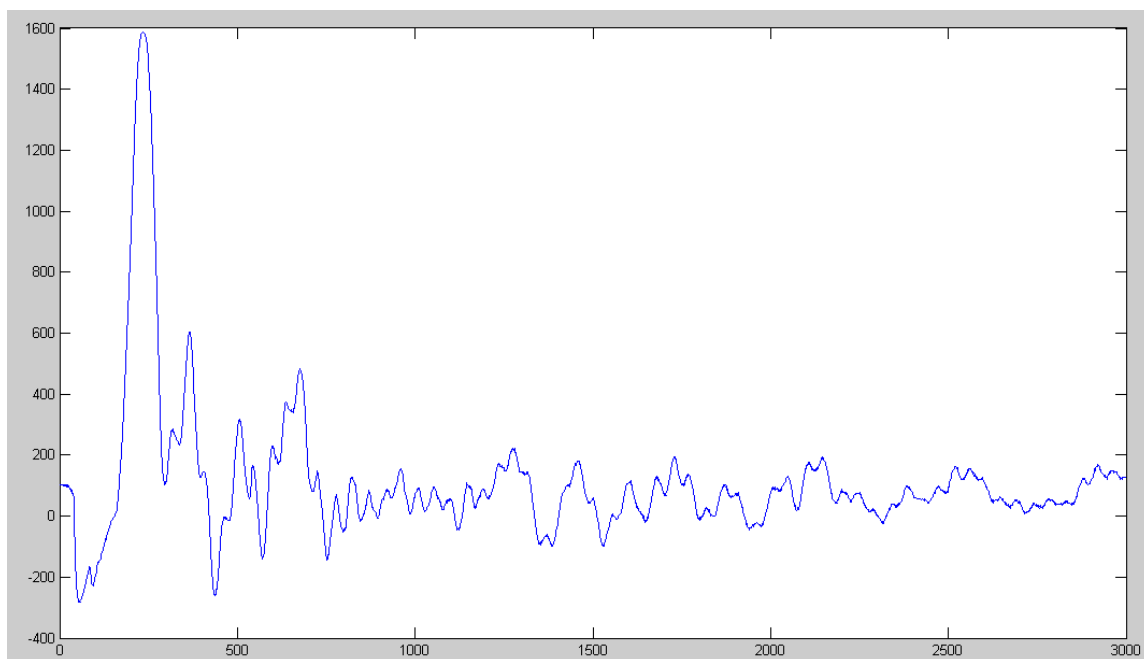


Рисунок В.5 – Удар кулею по навантаженому 40 кг датчику з вкрученим амортизатором

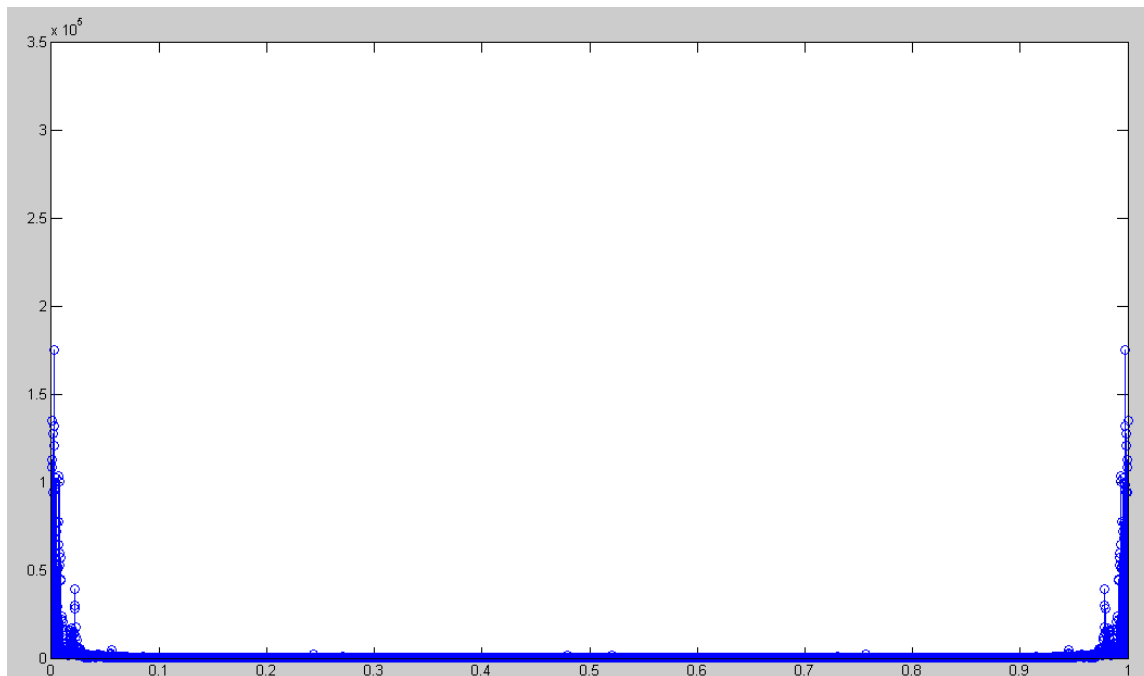


Рисунок В.6 – Спектр від сигналу, представленого на рисунку В.5

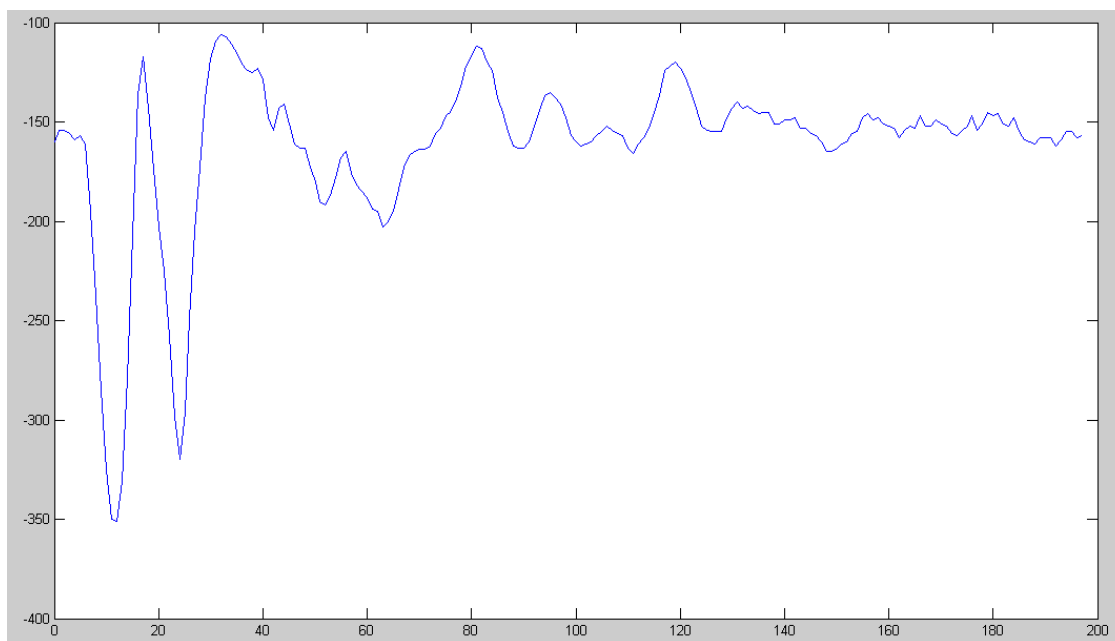


Рисунок В.7 – Удар кулею по навантаженому 60 кг датчику з вкрученим амортизатором

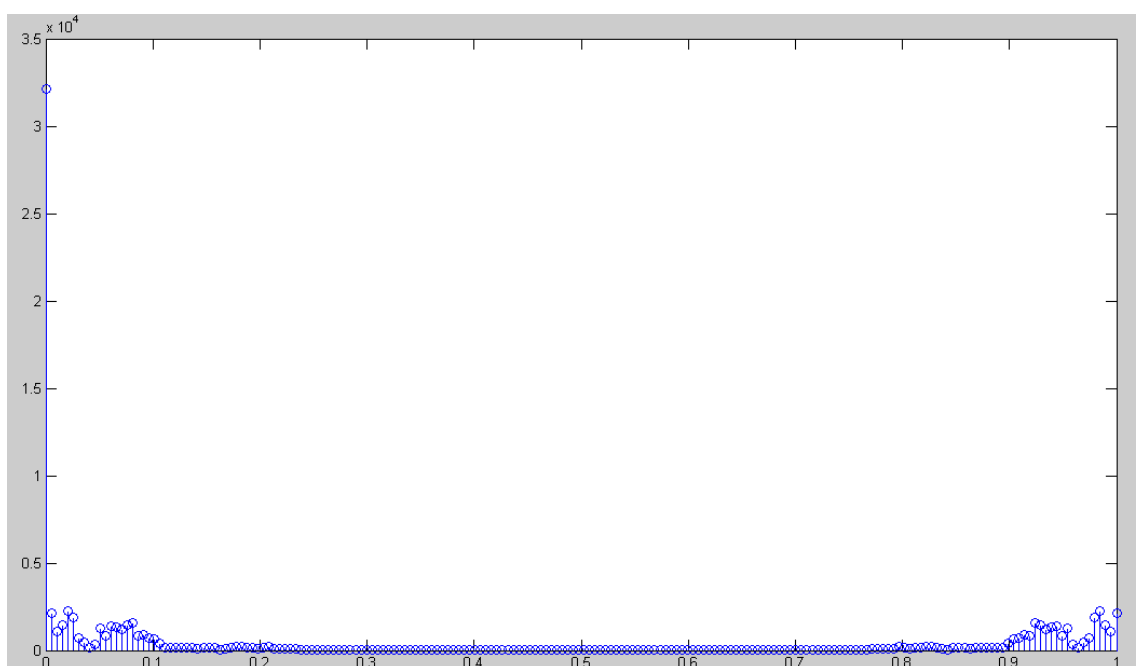


Рисунок В.8 – Спектр від сигналу, представленого на рисунку В.7

На рис. В.9 и В.10 показано залежність $U_{\text{вих}}(t)$ та спектр $S(f)$ для датчика ПВТС.

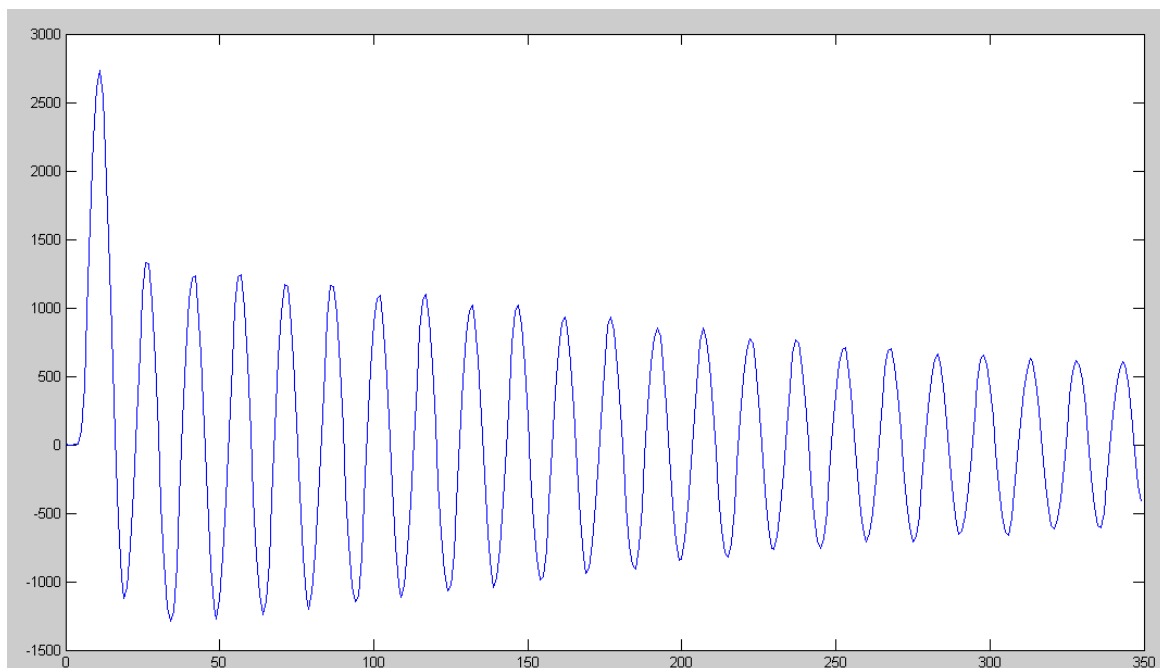


Рисунок В.9 – Удар кулею по ненавантаженому датчику, який знаходиться на металевому столі

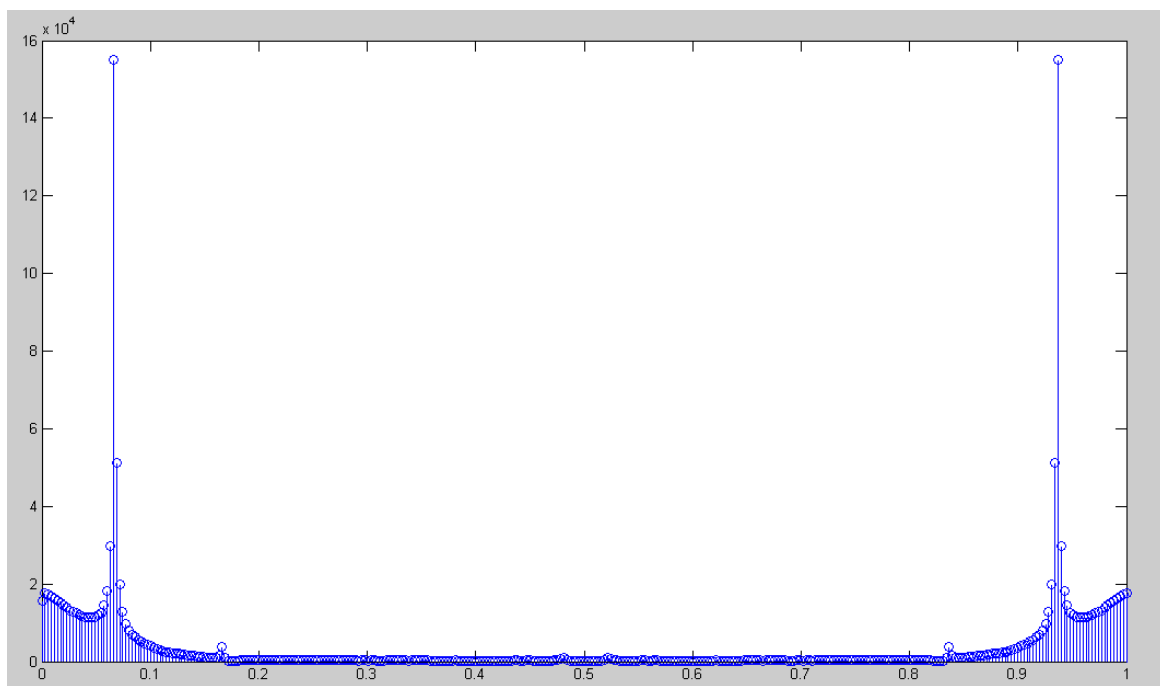


Рисунок В.10 – Спектр від сигналу, представленого на рисунку В.9

На рис. В.11 и В.12 показано залежність $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ та спектр $S(f)$ для датчика ESIT.

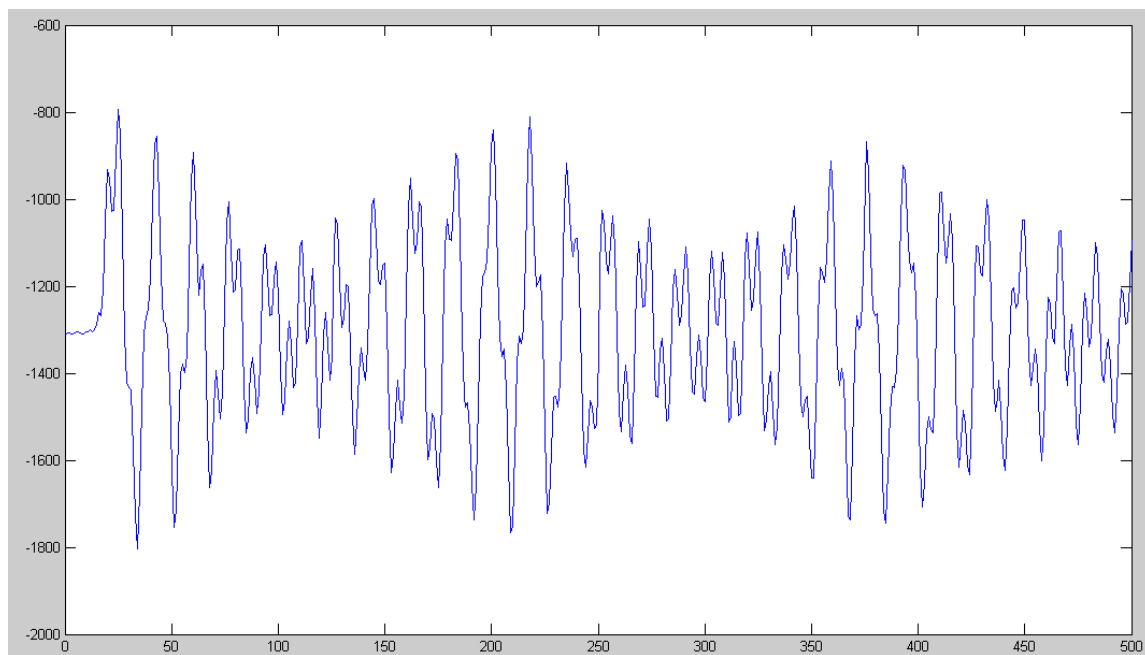


Рисунок В.11 – Удар кулею по ненавантаженому датчику, який знаходиться на гумовому килиму

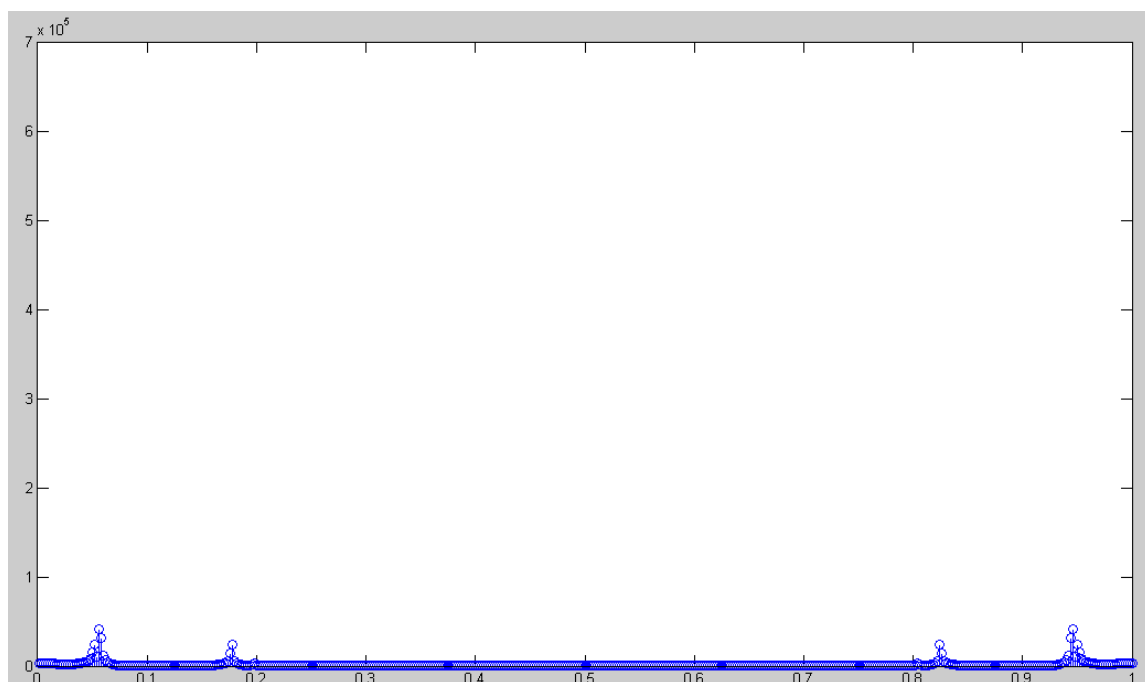


Рисунок В.12 – Спектр від сигналу, представленого на рисунку В.11

Додаток Г

Результати експериментальних досліджень власних частот коливань зсувних перетворювачів при впливі різних факторів

В таблицях Г.1 – Г.4 наведені результати експериментів при ударі кулькою з різних датчиків зсувного типу.

Таблиця Г.1 – Датчик зсувний НВМ RSCBC3: реакція на одиничний імпульс

Експеримент	Період власних коливань T, мкс	Частота власних коливань f, кГц
1. Удар кулею по датчику, що знаходиться на металевому столі	360	2,78
2. Удар кулею по датчику, що знаходиться на металевій консолі	359	2,79
3. Удар кулею по датчику, що знаходиться на дерев'яному столі	363	2,75
4. Удар кулею по датчику, що знаходиться на гумі	355	2,82
5. Удар кулею по датчику, що стоїть на амортизаторі	356	2,81
6. Удар кулею по датчику через кріплення з амортизатором	366	2,73
7. Удар кулею по датчику через амортизатор	357	2,8
8. Удар кулею по навантаженому 20 кг датчику з вкрученим амортизатором	2222	0,45
9. Удар кулею по навантаженому 40 кг датчику з вкрученим амортизатором	3450	0,29
10. Удар кулею по навантаженому 60 кг датчику з вкрученим амортизатором	3846	0,26
11. Удар кулею по навантаженому 20 кг датчику, що стоїть на гумовому килимку	2128	0,47

12. Удар кулею по навантаженому 40 кг датчику, що стоїть на гумовому килимку	3226	0,31
13. Удар кулею по навантаженому 60 кг датчику, що стоїть на гумовому килимку	3704	0,27
14. Удар кулею по навантаженому 20 кг датчику, що стоїть на круглому амортизаторі	2222	0,45
15. Удар кулею по навантаженому 40 кг датчику, що стоїть на круглому амортизаторі	3571	0,28
16. Удар кулею по навантаженому 60 кг датчику, що стоїть на круглому амортизаторі	3846	0,26

Таблиця Г.2 – Датчик зсувний ПВТС: реакція на одиничний імпульс

Експеримент	Період власних коливань T, мкс	Частота власних коливань f, кГц
1. Удар кулею по датчику, що знаходиться на металевому столі	378	2,65
2. Удар кулею по датчику, що знаходиться на гумі	377	2,65
3. Удар кулею по навантаженому 20 кг датчику, що стоїть на гумовому килимку	200	0,50
4. Удар кулею по навантаженому 40 кг датчику, що стоїть на гумовому килимку	278	0,36

Таблиця Г.3 – Датчик зсувний ПБТС: реакція на одиничний імпульс при ударі кулею з різної висоти

Експеримент: удар кулею по ненавантаженому датчику, що стоїть на металевому столі з висоти Н, м	Період власних коливань Т, мкс	Частота власних коливань f, кГц
0,5	375,0	2,67
	375,9	2,66
	378,9	2,64
1,0	375,0	2,68
	375,0	2,68
	375,7	2,67
1,5	375,0	2,68
	376,9	2,65
	375,0	2,68
2,0	376,6	2,66
	375,0	2,67
	375,0	2,67
2,5	375,0	2,67
	375,0	2,67
	375,0	2,67

Графік залежності амплітуди перехідного процесу від висоти удару кулею показаний на рис. Г.1.

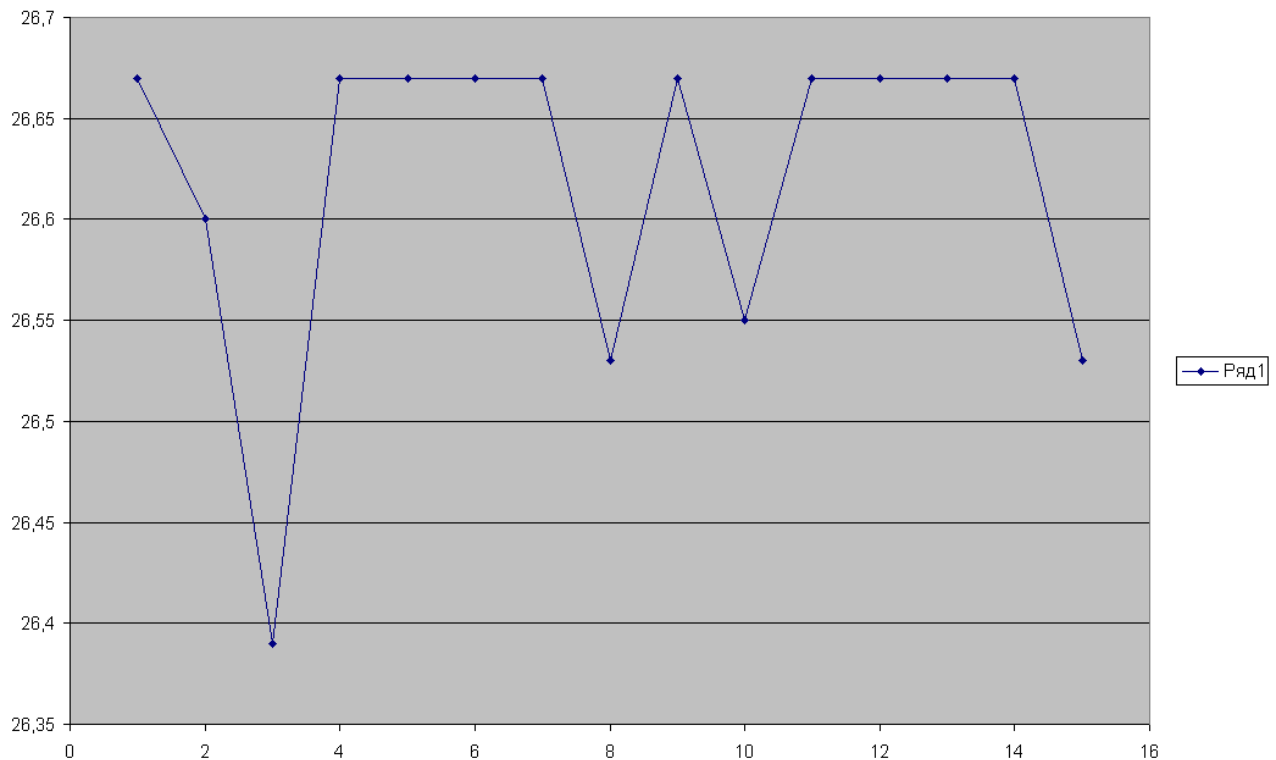


Рисунок Г.1 – Графік залежності амплітуди перехідного процесу від висоти удару кулею

Таблиця Г.4 – Датчик зсувний ESIT SCC3: реакція на одиничний імпульс

Експеримент	Період власних коливань T, мкс	Частота власних коливань f, Гц
1. Удар по ненавантажений датчику, що знаходиться на металевому столі	1389	720
2. Удар по ненавантажений датчику, що знаходиться на гумі	1379	725